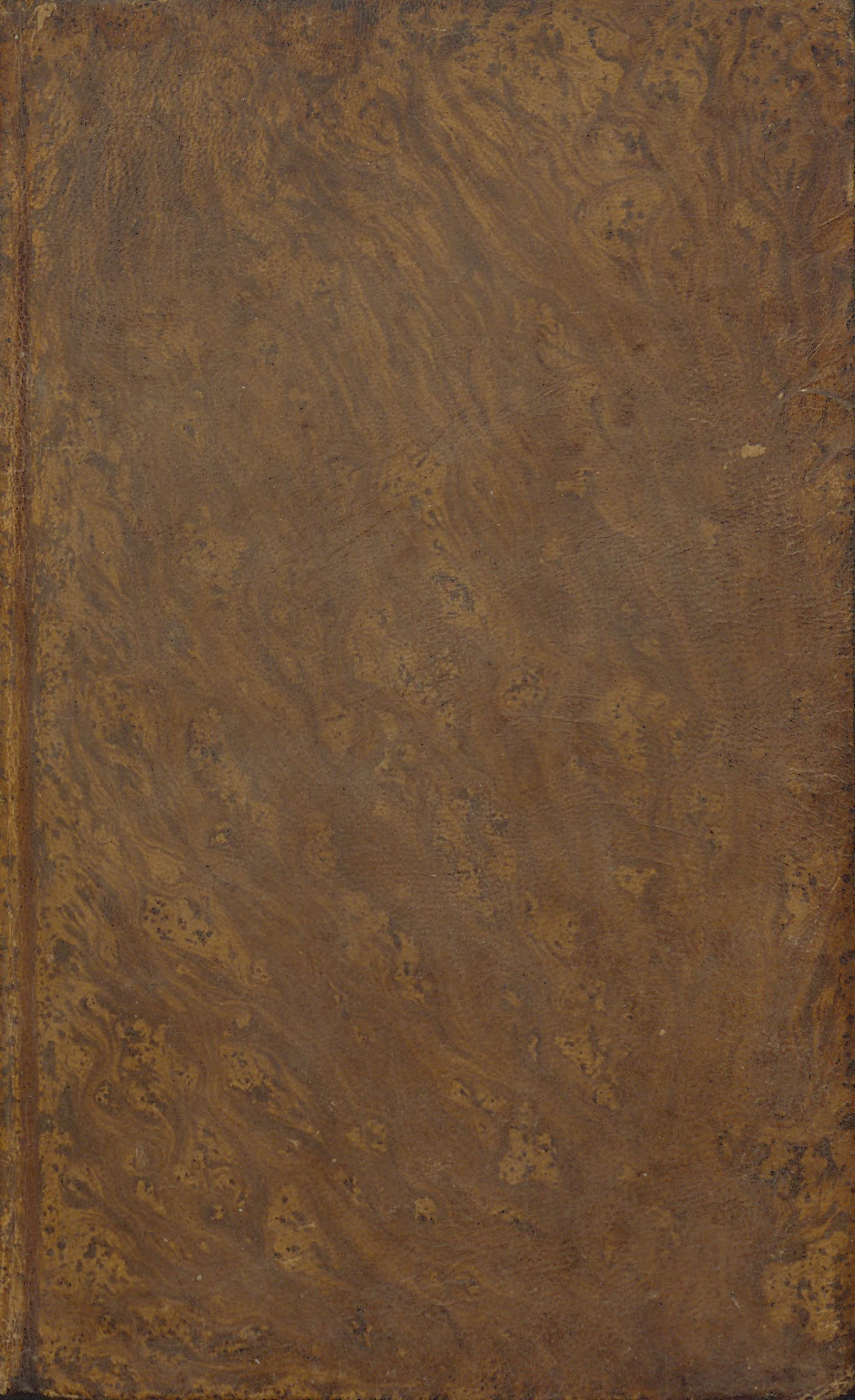






TRATADO DE FÍSICA
ESPERIMENTAL.

TRATADO DE FÍSICA ESPERIMENTAL

POR J. B. BIOT.

DESTINADO POR DECRETO DE LA COMISION DE INSTRUCCION PÚBLICA DE 22 DE FEBRERO DE 1817 PARA LA ENSEÑANZA EN TODAS LAS CÁTEDRAS DE FÍSICA DEL REINO DE FRANCIA:

TRADUCIDO

POR D. FRANCISCO GRIMAUD DE VELAUNDE,
Individuo de varias Corporaciones científicas y literarias peninsulares y estrangeras, y Discípulo de física de MM. Gay-Lussac, Biot y Tremery, Profesores en la Facultad de Ciencias, y en el Ateneo de Paris.

TOMO PRIMERO.

De Santiago Wall.

MADRID.

IMPRENTA DE REPULLÉS, *plazuela del Angel.*

AÑO 1826.

PRÓLOGO.

Los adelantos que todos los dias reciben las ciencias naturales, hace que aun los mejores tratados de ellas pierdan una parte de su mérito al cabo de algunos años, y haya que sustituírseles otros que den razon de los descubrimientos mas modernos. En castellano no tenemos ningun tratado de física que á la cualidad de estar al nivel de los conocimientos del dia, reuna la concision y claridad sin hacer uso de los cálculos sublimes que no estan al alcance de todos: esto nos ha movido á traducir el presente tratado elemental de fisica esperimental que no es otra cosa que el testo de las lecciones públicas, esplicadas en la Facultad de ciencias de Paris en 1816 y 1817 por los señores Biot y Gay-Lussac, estractado en gran parte del tratado general de fisica publicado por él primero.

En cuanto al juicio de la obra nos contentaremos con trasladar aqui algunas de las espresiones de su autor. "No sin pesar, dice, me he resuelto á presentar á mis discípulos una obra en que la fisica se halla despojada de lo que constituye su principal utilidad y certeza, á saber, las fórmulas y métodos matemáticos; y hubiera deseado ciertamente que el estado de la instruccion elemental en las escuelas públicas, me hubiera permitido atenerme á mi primer tratado. Estoy tan convencido como el que mas del principio que causan á los progresos reales de una ciencia, aquellas obras que la abrevian mutilándola, y cuya sencillez aparente proviene de la omision de los pormenores que constituyen la solidez de los resultados y los hacen susceptibles de aplicacion." Y mas adelante. "Sin duda se me dirá ¿por qué conociendo tanto los inconvenientes de esta especie de obras, ofrecer al público una de ellas?

Es pues, porque he creido evitar su principal defecto; es porque renunciando á los auxilios que ofrece el lenguaje algebraico, y abandonando con él las consecuencias mas distantes que nacen de las teorías y sus comprobaciones mas exactas, he creido que no debia omitir ninguno de los hechos que sirven para establecer de un modo seguro estas mismas teorías, ninguno de los medios con que se pueden observar estos hechos y ninguna de las consideraciones filosóficas que los unen entre sí. De este modo he juzgado que podia presentar en lenguaje vulgar, la sustancia, digámoslo asi, de la ciencia y no su superficie ó su esqueleto. En el curso dado en la facultad de ciencias, he esperimentado este método y he visto que un gran número de oyentes cuya mayor parte no conocia el lenguaje de las matemáticas, han percibido con placer, bajo esta forma racional, verdades que no hubieran podido entender de otro modo."

Tal es la defensa que hace de su obra Mr. Biot. Nosotros creemos que esto debe bastar para satisfaccion de los lectores; persuadidos no obstante de que el verdadero medio de llegar á poseer la ciencia, es estudiarla en toda su estension y para ello hallarse adornado de todos los conocimientos que son necesarios y sin los cuales jamas puede adquirirse una verdadera solidez en estas materias.

En órden á la traduccion de esta obra destinada en Francia á la instruccion pública por decreto de la comision del mismo título dado en 22 de febrero de 1817, el público juzgará de ella haciéndose cargo de las dificultades que presentan los tratados de ciencias naturales, respecto á las voces nuevas, á las que ha sido necesario sustituir otras en castellano.

En lo demas, habiendo estudiado la física con MM. Biot y Gay-Lussac en los cursos públicos de 1818 y 1820 y con Mr. Tremery en el Ateneo de Paris, hemos procurado esplanar bien el sentido de su doctrina, con el lenguaje claro y conciso propio de esta clase de obras.

TRATADO ELEMENTAL
DE FÍSICA.

LIBRO PRIMERO.

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA MATERIALIDAD, EL EQUILIBRIO Y EL MOVIMIENTO.

CAPÍTULO PRIMERO.

Exámen de las propiedades que nos hacen conocer los cuerpos.

Los metafísicos han dado definiciones muy diversas de la *materia*, y aun ha habido algunos que han llegado á dudar de que pudiésemos tener una certeza moral de su existencia. El físico no entra en estas discusiones. Apoyándose únicamente en la esperiencia, llama *cuerpos materiales* á todos los que producen sobre nuestros órganos, un conjunto de sensaciones determinadas; y la facultad de escitar en nosotros estas diversas sensaciones, le presenta otras tantas *propiedades*, por las cuales conoce la presencia de los cuerpos. Pero entre todas estas propiedades, dos solas son esencialmente necesarias para hacernos conocer la materia, á saber: la *estension* y la *impenetrabilidad*, cuyos primeros jueces son la vista y el tacto.

El carácter tomado de la estension, es evidente

por sí mismo. Cuando vemos ó tocamos un cuerpo, este cuerpo, ó si se quiere la facultad que tiene de obrar sobre nosotros, reside en ciertas partes del espacio, y no en otras: el lugar en que reside está pues, determinado, y por lo mismo es estenso.

Cuando seguimos los contornos de un cuerpo por medio del tacto, conocemos que la materia que le compone reside fuera de nosotros. En general, dos porciones distintas de materia no pueden jamás identificarse de modo que unos mismos puntos físicos del espacio nos den á la vez la sensacion de ambas. En esto consiste la impenetrabilidad.

Para hacer ver cuán necesaria es la reunion de esta cualidad con la estension, para constituir el estado de cuerpo, propondré un ejemplo, en que pueden observarse estas propiedades separadamente.

Cuando se coloca un objeto pequeño delante de un espejo cóncavo de metal, cuya superficie sea esférica, se forma á alguna distancia del espejo una imágen muy parecida al objeto, que puede verse con la mayor claridad, colocándose á una distancia conveniente. Esta imágen, distinta de las partes del espacio que la rodean, es estensa, pero no impenetrable. Puede meterse en ella la mano sin esperimentar la menor resistencia; en cuyo caso las partes que se tocan no varían de lugar, sino se desvanecen segun se las va tocando; y ciertamente no se podria penetrar asi un pedazo de madera ó piedra, ó cualquier otro cuerpo de los que se llaman sólidos. Tambien se puede, colocando segun convenga otro espejo, hacer coincidir en el sitio donde se halla esta imágen la de otro objeto, sin que mude absolutamente de lugar la primera. Igualmente pueden hacerse coincidir las imágenes de un tercero y cuarto objeto, y cuantos se quieran. Todas estas imágenes son estensas, pero no son impenetrables; son *formas*, y no *materia sensible*; distincion necesaria, pues como veremos mas adelante, la luz que forma estas imágenes está compuesta de pequeñas molécu-

las materiales de una sutileza insensible, que se mueven con una estrema velocidad; y en este caso no hacen mas que pasar unas entre otras en los intervalos que las separan.

Antes de pasar adelante, es preciso presentar algunos fenómenos muy simples, que á primera vista parecen contradecir la impenetrabilidad de la materia; pero que examinándolos mas despacio, no hacen realmente sino confirmarla.

Cuando se deja caer un cuerpo sólido, por ejemplo, una masa de oro en un fluido como el agua, se introduce en él, y parece penetrable; pero realmente no hace mas que separar y hacer mudar de sitio sus partículas; porque si el vaso que encierra el agua termina en un cuello estrecho por la parte superior, se vé elevarse en este cuello el nivel del líquido, á proporcion que aumenta el volúmen del cuerpo sumergido. Hay, pues, division y separacion, pero no penetracion íntima. Lo mismo sucede cuando introducimos un clavo en una tabla, ó partimos leña con una hacha, sin mas diferencia que las partes de estos cuerpos se dejan separar mas difícilmente que el agua. Tambien se verifica lo mismo si se mete el clavo en una masa de greda, de plomo ó de oro, en la cual no hace mas que procurarse lugar separando las partículas materiales. La masa atravesada de este modo no se desune enteramente; pero sus partes se comprimen unas contra otras; y si se estraen las que rodean el agujero hecho por el clavo, se encontrarán marcas sensibles de esta presion. El clavo puede ser tambien agujereado con un instrumento de acero, y este á su vez rayado por otros cuerpos.

Esto nos demuestra que aun los cuerpos mas duros y sólidos no se componen de una materia absolutamente contínua, sino de partes agregadas unas á otras, y colocadas á distancias que pueden ser mas ó menos grandes, segun la influencia de las causas esteriores. Esto nos esplica tambien, como una

masa de materia puede aumentar de volúmen por efecto del calor, y disminuir por el enfriamiento: como al desunirse las moléculas de las sales pueden diseminarse, y por decirlo asi, perderse entre las moléculas del agua: como el mercurio puede unirse al oro sumergido en él, y penetrar hasta el interior de la masa: y como en fin estas mezclas y estas disoluciones pueden algunas veces verificarse sin un aumento visible del volúmen total; pues este se mide por la forma esterior de los cuerpos, prescindiendo de los vacíos sensibles ó no á nuestra vista, que pueden hallarse entre sus partes. En todo esto no hay mas que separacion y mezcla, sin penetracion de las partes materiales.

Esta discontinuidad de la materia en los cuerpos se designa generalmente con el nombre de *porosidad*; y se llaman *poros* los intersticios que separan sus partículas. La porosidad parece ser una propiedad general y comun á todos los cuerpos que nos presenta la naturaleza, aun cuando no sea inherente á la esencia de la materia, puesto que podriamos muy bien concebir la existencia de cuerpos sensibles sin esta propiedad.

Pero convenidos en mirar las masas de los cuerpos naturales como compuestas de partes muy pequeñas que constituyen su esencia, se puede preguntar cuál es la forma y tamaño de estas partes. Parece que el tamaño debe ser estremamente pequeño; pues por mas que se divida el oro, ya hilándole, ya convirtiéndole en planchas, las partículas mas pequeñas de él, conservan siempre todas las propiedades que presenta la masa entera. Los cuerpos cristalizados, reducidos á polvo casi impalpable, y mirados al microscopio, ofrecen aun las mismas formas y los mismos ángulos que caracterizaban la masa total del cristal. Tenemos ejemplos de una division aun mayor en los olores, que no son otra cosa mas que sensaciones producidas por las partículas insensibles é impalpables de los cuerpos olorosos. To-

do nos prueba que un cuerpo puede ser dividido en partes, cuya pequeñez sea inconcebible á nuestros sentidos, y aun á nuestra imaginacion, sin cambiar de naturaleza, ni dejar de ser idéntico á las mayores masas de la misma materia.

Los metafísicos y aun los físicos, han disputado mucho entre sí, sobre si esta divisibilidad de la materia llega ó no al infinito; esta es una pura cuestion de nombre. Si se trata de una divisibilidad abstracta y geométrica, no hay duda alguna que puede ser indefinida, pues por infinitamente pequeña que se suponga una partícula, por sola la circunstancia de ser estensa, se podrá siempre concebir su estension dividida en dos mitades, cada una de estas en otras dos, y así hasta el infinito; pero si se trata de una divisibilidad real y física, nada podemos decir con seguridad. Sin embargo, los resultados parece indican que sobre nuestro globo las partículas no se dividen, no se alteran, ni se convierten unas en otras. Cualquiera que sea la accion química que se les haga sufrir, cualesquiera que sean las combinaciones en que se les haga entrar, y las asimilaciones con los cuerpos vivos que esperimenten, siempre salen con sus propiedades originales. La infinita variedad de acciones de este género, que han obrado sobre ellas desde la creacion del mundo, parece no ha producido ninguna alteracion en sus propiedades.

Pero ¿cómo semejante sistema de partículas, puede existir agregado en forma de masas sólidas y resistentes, como vemos que lo son un gran número de cuerpos, y aun todos ellos? Mas adelante veremos que este estado nace y se mantiene por medio de fuerzas naturales, de que estan animadas todas las partículas de los cuerpos, que las hacen dirijirse mútuamente unas á otras *como por atraccion*. Pero si estas fuerzas existiesen solas, las partículas se aproximarían hasta tocarse, es decir, hasta que fuesen detenidas por la impenetrabilidad, lo cual es contrario á la posibilidad de alejarse y acer-

carse que conservan en los cuerpos; asi es que veremos despues que existe una causa general de repulsion interior, por la cual estan contrabalanceadas todas las fuerzas atractivas. Esta causa, que reside en todos los cuerpos de la naturaleza, parece ser producida por el principio del calor. Las partículas de cada cuerpo, solicitadas á la vez por estos dos géneros de fuerzas contrarias, se ponen en el estado de equilibrio que resulta de la comparacion de la energía de ambas, y se aproximan ó separan, segun las fuerzas esteriores á que se les espone, favorecen la atraccion ó la repulsion. Asi es, que los astros que componen nuestro sistema planetario se mueven y oscilan en las diferentes elipses que constituyen sus órbitas, sin que el sistema se destruya, ni se rompa el equilibrio general. De estos diferentes estados de equilibrio de los cuerpos, resultan, como veremos luego, todas las propiedades secundarias y variables, tales como el *estado aeriforme*, *la liquidez*, *la solidez*, *la cristalizacion*, *la dureza*, *la elasticidad &c.*

En todos estos fenómenos las moléculas materiales son como otras tantas masas absolutamente *inertes*, es decir, privadas de toda especie de espontaneidad. Pueden ser movidas, dislocadas, ó detenidas por causas esteriores é independientes de ellas; pero jamás nos dan la menor señal de una voluntad propia y libre. Si la bola que rueda sobre el paño de una mesa de villar, en virtud de la impulsion que se la ha dado, detiene poco á poco la velocidad de su movimiento, y al fin se para, es únicamente efecto de la contínua resistencia que le oponen las asperezas del paño en que frota, y las moléculas del aire en que se mueve. Póngase un paño mas suave, y la misma impulsion hará mover á la bola mas largo tiempo; substitúyase un plano de mármol pulimentado, y bandas formadas por arambres metálicos, cuya elasticidad sea la mayor posible, y la duracion del movimiento será incomparablemente

mayor; lo cual indica que seria indefinida si se pudieran quitar absolutamente los obstáculos. La piedra que arrojamos de lo alto de una torre, y que solicitada al mismo tiempo por esta impulsion y por la pesantez va á caer á cierta distancia, pierde igualmente su velocidad por efecto del choque con las partículas de aire que comprime unas con otras: pero supongamos que este aire no existiese, y que la fuerza de la impulsion fuese bastante enérgica para alejar de la tierra la piedra por su movimiento tangencial; otro tanto como la pesantez la hace bajar en cada instante; entonces la piedra describiria un círculo al rededor de la tierra; y como nada la detendria en su curso, giraria asi eternamente. Esto es, en efecto, lo que sucede á la luna, que se mueve en el vacío al rededor de la tierra; é igualmente vemos perpetuarse los movimientos de los otros cuerpos planetarios, que recorren un espacio absolutamente privado de materia resistente. Todo, pues, nos hace creer que la materia no puede por sí misma darse ni quitarse el movimiento ó el reposo; y que puesta una vez en uno de los dos estados, permaneceria asi eternamente, si una causa estraña no viniese á obrar sobre ella. Esta indiferencia, esta falta de voluntad propia, ha recibido el nombre de *inercia*. Una sola clase de cuerpos parece esceptuarse de esta ley, á saber: los seres que se llaman animados, y que se mueven ó detienen por efecto de una voluntad interior; pero aun en estos las moléculas materiales que componen sus partes, y aun estas mismas partes, son absolutamente inertes. Su conjunto posee la cualidad de ser animado; pero separadas las partes dejan de vivir, y entran bajo las leyes ordinarias y comunes á todos los otros cuerpos. Nada sabemos acerca de la causa de esta diferencia, é ignoramos completamente qué es lo que determina el estado de vida; pero viendo la materia en toda otra circunstancia privada de voluntad, y reconociendo que aun en los seres vivos

pierde esta facultad por la muerte y el sueño, debemos mirarla como estraña á su esencia; y colocando este caso bajo la influencia de las leyes ordinarias, considerar la voluntad de los seres animados como obra de un principio interior é inmaterial que reside en ellos. A la verdad, no podemos decir en qué parte reside este principio, en qué consiste, ni cómo siendo inmaterial puede obrar sobre la materia; pero por poco que hayamos reflexionado sobre nosotros mismos, y hayamos observado con alguna atencion las obras de la naturaleza, estas obscuridades, por desgracia demasiado frecuentes, en que nos deja la imperfeccion de nuestros conocimientos, no deben nunca ser para nosotros el fundamento de una objecion, contra cosas que estamos reducidos á ignorar. Asi obramos filosóficamente en este caso como en cualquier otro, valiéndonos de analogías, y haciendo depender el movimiento de los cuerpos animados de una causa distinta de su materia, pues encontramos á esta inerte en cuantos casos queremos esperimentarla. En las escuelas de filosofia se da aun otra razon para atribuir la espontaneidad á una causa inmaterial, á saber: que la voluntad, por la naturaleza misma de sus actos, no puede menos de emanar de un ser simple, y por consiguiente no puede pertenecer á un ser esencialmente compuesto, ó á lo menos divisible y capaz de descomposicion, como la materia; pero no perteneciendo este motivo metafisico á nuestras consideraciones ordinarias, nos limitaremos á enunciarle; y para todas las investigaciones esperimentales nos bastará admitir la inmaterialidad del principio de la voluntad como una distincion fundada en la analogía, y la *inercia* de la materia como una propiedad general en el estado presente del universo.

La esperiencia hace descubrir aun en la materia otras muchas propiedades igualmente accidentales, es decir, que parecen no ser absolutamente indispen-

sables para que los cuerpos materiales se manifiesten á nuestros sentidos; pero cuya concurrencia simultánea con las condiciones primitivas de la materialidad, es importantísimo conocer, pues suplen por estas un gran número de casos, en que es imposible observarlas. Tal es, por ejemplo, la *gravedad* ó *pesantez*. Entre los cuerpos naturales que se pueden ver y tocar, no encontramos ninguno absolutamente que no sea pesado, es decir, que no tenga tendencia á caer hácia el centro de la tierra, cuando se le abandona á sí mismo. Y pues todas estas propiedades van siempre juntas, la existencia de una de ellas en un cuerpo nos basta para juzgar por induccion que todas las otras existen en el mismo cuerpo. Asi, aunque no podemos ver ni tocar el aire del mismo modo que vemos y tocamos los otros cuerpos, juzgamos que es una sustancia material, porque es pesado, capaz de compresion, y produce otros muchos fenómenos, todos semejantes á los que deben producir los fluidos. Un exámen profundo de estas propiedades nos hace conocer que hay aires de especies muy diversas, que son otras tantas sustancias esencialmente distintas unas de otras, por los efectos que obran sobre otros cuerpos y reciben de ellos.

La *atraccion* es aun otra de estas propiedades secundarias que suple á los testimonios inmediatos de los sentidos. He dicho antes que las partículas de todos los cuerpos conocidos obraban unas sobre otras por medio de fuerzas atractivas y repulsivas; pues recíprocamente, cuando se puede demostrar la existencia ó accion de estas fuerzas en un principio desconocido, se infiere que este principio es material. Asi, la *luz* no es palpable, ni puede reconocerse su estension; no puede pesarse, á lo menos en nuestras balanzas; en fin, es tan sutil, que son inútiles todos los medios que nuestros sentidos emplean para conocerla. Pero haciéndola atravesar cuerpos trasparentes, hallamos que toma una direccion curva al

atravesarlos, como sucederia si estuviese repelida por una fuerza emanada de la superficie de estos cuerpos, y atraida á su interior por las moléculas que los componen. Sabemos tambien que emplea un cierto tiempo, muy pequeño, sí, pero mensurable, en llegar á nosotros desde los cuerpos luminosos. En fin, verificando diversas pruebas, hallamos que los cuerpos transparentes atraen y repelen los rayos de luz de distinto modo por unas partes que por otras. Este conjunto de propiedades nos hace concluir, que la luz es una sustancia material, compuesta de partículas estremamente pequeñas, cuya forma es simétrica por algunos lados, susceptible de atracciones y repulsiones particulares; y en fin, que se mueve en el espacio ó en los cuerpos transparentes con una velocidad dada.

Todavía hay otros principios que obran sobre los cuerpos materiales, sin ser visibles, ni palpables, ni ponderables en ninguna balanza, y que hasta ahora no ofrecen, ni con mucho, tantos caractéres materiales como la luz, y que sin embargo se cree tambien que son cuerpos. Tales son los principios desconocidos de las dos *electricidades*, llamadas resinosa y vítrea. Nada se ha esplicado hasta hoy de estos principios que sea material, ó á lo menos que no sea esplicable sin materialidad. Se atraen y repelen recíprocamente, es verdad; pero únicamente ejercen esta accion entre sí mismas: los otros cuerpos no ejercen sobre ellas ninguna especie de fuerza, ni atractiva, ni repulsiva. A pesar de todo, en su distribucion sobre los cuerpos, y en el paso de unos á otros por medio de los obstáculos que los separan, obran estos principios de un modo tan conforme á las leyes ordinarias de la mecánica de los fluidos, que con ellas se pueden calcular de antemano los menores detalles de los fenómenos. Las mismas probabilidades se aplican tambien á los dos principios *magnéticos* que se pueden desenvolver en algunos metales.

Aun hay mas corto número de datos sobre la materialidad del principio del *calor*. No solo carece como los anteriores de las propiedades sensibles que caracterizan la materia, sino que ademas, no estando completamente conocidas las leyes de su equilibrio ni de su movimiento, no se le pueden aplicar tantas probabilidades. Por medio de esperiencias se le vé esparcirse en los cuerpos, pasar de uno á otro, fijarse, separarse de ellos, y modificar la disposicion, las distancias, y las propiedades atractivas de sus partículas; pero nada de esto demuestra de un modo evidente que este principio sea un cuerpo. La razon mas fuerte que tenemos para creerlo consiste acaso en algunas analogías descubiertas últimamente entre las propiedades radiantes del calor y de la luz, que inclinan á creer que uno de estos principios puede gradualmente cambiarse en el otro, es decir, adquirir ó perder sucesivamente las propiedades ó modificaciones que producen en nosotros la sensacion de la vision ó del calor. El conocimiento de estas analogías es uno de los objetos mas importantes, y digno de investigacion.

Estos son los únicos principios activos, que parece determinan los fenómenos naturales; pero es muy posible que haya otros muchos, cuya sutileza los sustraiga á nuestros procedimientos y esperiencias. Solo perfeccionando estos procedimientos, dándoles mayor precision, y buscando é inventando indicadores mas sensibles, podremos dar mayor estension á nuestro poder sobre los agentes naturales, ó descubrir los que hasta ahora estan desconocidos.

El objeto principal de la física es el de probar por medio de esperiencias exactas, y representar por leyes generales las modificaciones accidentales y pasageras que pueden producir en los cuerpos materiales los principios que acabamos de designar; porque como estas modificaciones, aunque no hagan mudar de naturaleza á los cuerpos que afectan, alteran casi siempre las acciones que dichos cuerpos pueden

ejercer entre sí, y sobre las otras sustancias, es preciso determinarlas y medirlas antes de examinar los fenómenos de composicion y descomposicion que puede producir la accion recíproca de los cuerpos. Asi es, que el estudio de la física es útil á la química, á la medicina y á la fisiologia, tanto animal como vejetal, y debe preceder al de estas ciencias.

CAPÍTULO II.

Nociones fundamentales; espacio, reposo, movimiento, fuerza.

Acabamos de ver en el capítulo anterior, que todos los cuerpos de una estension sensible, y cuya materialidad puede reconocerse inmediatamente, estan formados por la acumulacion de una multitud de partículas materiales estremamente pequeñas, cuyo modo de agregacion es el que constituye al cuerpo sólido, líquido ó gaseoso. Hemos espuesto tambien los motivos que nos hacen considerar estas partículas como masas inertes, incapaces de modificarse por sí mismas, y propias solo para *obedecer* á las causas esteriores que pueden obrar sobre ellas; sea que el defecto de voluntad y de espontaneidad forme un carácter general y esencial de la materia, como indican las observaciones, sea que por una abstraccion de nuestro espíritu, les quitemos estas propiedades, si acaso alguna vez las tienen, para considerar aisladamente el conjunto de las demas que les quedan. Ahora bien, considerando estas moléculas materiales en el estado de inercia, resultan en los fenómenos que presenta su conjunto, ciertas condiciones necesarias, que son aplicables á todos los cuerpos, independientemente de la naturaleza química de sus partes constituyentes, y solo como simples consecuencias de su materialidad. Tales son las *leyes generales del equilibrio y del movimiento*, que se deducen matemáticamente de sola la *inercia*. Aun-

que esta deduccion, fundada enteramente sobre el cálculo, no puede demostrarse aqui, enunciaremos, sin embargo, sus principales resultados; pues segun lo que acabamos de ver, son de una aplicacion universal y constante, en el estudio de los fenómenos naturales.

Pero para hacer una esplicacion por simple que sea, nos es forzoso fijar exactamente algunas ideas fundamentales, por ejemplo, las de reposo, movimiento y fuerza; pues aunque hemos usado ya de estas espresiones, ha sido como parte del lenguage ordinario, y ahora necesitamos darles para siempre un sentido fijo y determinado. Empecemos, pues, por definir el sitio en que se producen estos fenómenos. Para esto procuremos concebir un espacio sin límites, inmaterial, inmutable, y cuyas partes, todas semejantes entre sí, puedan ser penetradas libremente por la materia. Nada nos importa que exista ó no semejante espacio en la naturaleza, pues nos sirve solo para representarnos abstractamente la estension. Coloquemos en él las moléculas ó elementos materiales de los cuerpos, y por el pronto consideremos solo la existencia de estos elementos. Este simple hecho será susceptible de dos modificaciones distintas, porque podrá suceder que una molécula subsista invariablemente en un mismo lugar, ó que por influjo de causas esteriores se quite de donde está para ocupar otro lugar del espacio. El primero de estos dos estados constituye el *reposo absoluto*; el segundo el *movimiento*.

Mas aun podemos concebir que dos ó mas moléculas abandonen á un mismo tiempo el lugar que ocupan por un movimiento comun, conservando fijas entre sí sus respectivas posiciones. Entonces, si se las considera con respecto al espacio inmutable, realmente estarán en movimiento; pero si solo se las considera con relacion á su posicion mútua, se hallarán en el mismo caso que si todo el grupo hubiese permanecido en reposo; y si en una de ellas existiese un ser inteligente que observase to-

das las otras, es claro que no podria decidir si el sistema total se movia ó no. Esta permanencia de posiciones en medio de un movimiento comun, es lo que se llama *reposo relativo.* Tal es el caso de muchos objetos colocados en un barco, abandonado á la corriente tranquila de un rio; tal es igualmente el de todos los cuerpos terrestres que permanecen siempre fijos en un mismo punto de la tierra; estan en reposo entre sí; pero la tierra que gira diariamente sobre sí misma les imprime un movimiento de rotacion, y los hace marchar á todos juntos por su órbita al rededor del sol, que á su vez arrastra acaso la tierra y todo el sistema planetario hácia alguna lejana constelacion. El reposo relativo, es, pues, verosímilmente el único que existe en el universo, ó á lo menos es el único que podemos observar con seguridad.

Esto nos conduce á hacer una especificacion análoga respecto al movimiento, y á distinguir los *movimientos absolutos* de los cuerpos, considerados con relacion al espacio inmutable de los cambios de posicion relativa que pueden tener entre sí. Estos últimos se llamarán, pues, *movimientos relativos*; sea que el sistema de cuerpos en que se consideran se halle en movimiento, sea que se halle en reposo. Por ejemplo, las variaciones de posicion de los astros, segun las observamos desde la superficie de la tierra, no son movimientos absolutos, sino relativos; pues la tierra, á quien los referimos como á un punto fijo, tiene en realidad un movimiento de rotacion diurna, y un movimiento anual de circulacion al rededor del sol. Y aunque por medio de cálculo hemos llegado á determinar los movimientos reales de los astros, tales como se verian desde el centro del sol, no podemos afirmar que estos movimientos sean absolutos, pues acaso el sol, y todo el sistema planetario, se mueve junto en el espacio como hemos dicho antes.

Segun la idea que la esperiencia nos da de la

inercia, no debemos considerar el estado de movimiento y el de reposo, sino como simples accidentes de la materia, que no puede esta darse á sí misma, ni cambiarlos cuando ha recibido uno de ellos. Por consiguiente, cuando la vemos pasar de uno de estos estados al otro, debemos concebir que este cambio es producido y determinado por la accion de causas esteriores. Estas causas, sean las que quieran, se designan en general con el nombre de *fuerzas.* La naturaleza nos ofrece un gran número de ellas, que son, á lo menos en apariencia, de diferentes especies. Tales son las fuerzas producidas por los músculos y órganos de los animales vivos, cuyo ejercicio depende casi siempre únicamente de su voluntad. Tales son tambien las que producen los agentes fisicos, como la dilatacion de los cuerpos por el calor, su condensacion por el enfriamiento &c. Hay otros que parecen inherentes á ciertos cuerpos, como lo es la atraccion del iman respecto al hierro, y la que se verifica entre los cuerpos electrizados. Son fuerzas del mismo género las que producen la caida de los cuerpos hácia el centro de la tierra, las afinidades químicas, y la circulacion de los planetas al rededor del sol. Ignoramos absolutamente la naturaleza íntima de estas fuerzas; y nos seria imposible decidir, si son estrañas á la materia, ó propias de su esencia, sin embargo, es útil y filosófico separarlas de ella con el pensamiento, á fin de no tener que considerar en la naturaleza fisica sino masas inertes, solicitadas por causas de movimientos.

Cada fuerza se caracteriza y define conforme á las circunstancias particulares de su modo de obrar. Desde luego es preciso fijar el punto material á que se aplica, y la *direccion* en que se ejerce; en seguida se debe hacer conocer su energía, ó segun la espresion técnica, su *intensidad.* Para esto se elije una fuerza cualquiera, cuya intensidad se toma por unidad de medida, y se espresa por 1 la de toda fuerza igual á esta, es decir, que si estuviese aplicada

en sentido contrario al mismo punto material, destruiria el efecto de la primera. Se concibe despues un conjunto de dos ó mas fuerzas iguales, que obran en un mismo sentido y sobre un mismo punto material, y se dice que la fuerza compuesta que resulta de ellas tiene una intensidad doble, triple, cuadrupla, ó en general multipla de la primera, segun el número de fuerzas que la forman; de modo, que la intensidad se halla espresada por este número. Tambien se las puede representar por medio de líneas rectas de diferentes tamaños en la razon que indican los números. Es cierto que para realizar estas comparaciones es preciso saber determinar respecto á cada fuerza la relacion de su intensidad con la energía de los movimientos que es capaz de imprimir á un mismo cuerpo, y mas adelante trataremos de este punto; pero entre tanto la definicion de la relacion de las fuerzas y de sus intensidades relativas basta para fijar muchas leyes generales que se observan constantemente en su concurrencia.

En fin, para acabar de definir una fuerza es preciso hacer conocer si su accion es súbita é instantánea, como un simple choque que no se repite, ó si es reiterada y durable como la pesantez, que como veremos, continúa siempre obrando sobre el cuerpo que cae con tanta energía como cuando empezó á moverse. Este segundo modo de obrar puede referirse al primero, substituyendo á la continuidad de la fuerza, una sucesion de acciones, separadas unas de otras por intervalos insensibles de tiempo; iguales todas entre sí, si la fuerza que se quiere representar es constante, ó de diferente intensidad si es variable la fuerza que ha de representarse. Por medio de este artificio, que no altera en nada la exactitud de las consecuencias, se consigue no tener que considerar mas que el efecto de las impulsiones súbitas que se hacen sufrir á las moléculas materiales absolutamente inertes, ya sea en el estado de reposo, ya en el de movimiento.

CAPÍTULO III.

Del equilibrio producido por la composicion de muchas fuerzas aplicadas á un mismo punto material.

Cuando una sola fuerza está aplicada á un punto material, libre, es evidente que este punto, en virtud de su inercia, debe moverse segun la direccion de la fuerza, y sobre su prolongacion. Pero cuando muchas fuerzas obran simultáneamente sobre un mismo punto material, ó sobre un sistema de puntos semejantes, pueden verificarse dos casos, que es preciso distinguir. Puede suceder, que el conjunto de las fuerzas que obran comunique movimiento al punto ó sistema, y puede suceder tambien, que destruyéndose sus acciones, el sistema permanezca en reposo. El reposo, producido de este modo por la compensacion de muchas fuerzas activas, se llama *equilibrio*, para distinguirle del reposo inerte, producido por falta de fuerza motriz, aunque uno y otro son iguales en la apariencia.

El caso mas simple del equilibrio es aquel en que dos fuerzas iguales se aplican en direcciones opuestas á un mismo punto material. Este punto, que se halla impelido con una energía igual en dos sentidos contrarios, no puede menos de permanecer en reposo; mas si las dos fuerzas son desiguales en intensidad, se moverá en la direccion de la mas enérgica, como si únicamente estuviese impelido por su diferencia.

Solo en el caso de oposicion directa pueden dos fuerzas, aunque iguales, equilibrarse mútuamente; mas siempre que sus direcciones forman algun ángulo entre sí, sus esfuerzos conspiran en parte, y el punto material sobre que obran se pone en movimiento, en una direccion que es preciso determinar. Para conseguirlo, empecemos por el caso simple, en que las

dos fuerzas combinadas tengan iguales intensidades. Supongamos que M, fig. 1, representa el punto en que obran las fuerzas, y que las rectas indefinidas M A, M B, denotan sus direcciones, de M hácia A, y de M hácia B; tomemos sobre estas rectas las dos porciones iguales M F, MF′, para representar las intensidades de las dos fuerzas, segun esplicamos antes. Es evidente que su esfuerzo comun conspirará á hacer mover el punto M en la direccion M C, que se halla exactamente en medio de las dos, puesto que obrando simétricamente, y con una energía igual á uno y otro lado de esta línea, no hay ninguna razon para que hagan ir al punto, mas bien á un lado que al otro. Réstanos, pues, saber, cuál será la energía del esfuerzo que resulta de la accion simultánea de ambas fuerzas. Por la estremidad F y F′ de cada fuerza, esto es, de la parte de línea que la representa, tírese una recta, paralela á la otra fuerza; estas dos líneas cortarán á M C en un mismo punto R, y la longitud M R representará la *resultante* de las dos fuerzas M F, M F′; es decir, que su accion simultánea sobre el punto M será exactamente igual á la que produciria una sola fuerza M R, aplicada en la direccion M C. Por consiguiente, si sobre la prolongacion de MC se aplica una nueva fuerza MR′, igual y opuesta á esta resultante, se destruirá la accion de esta, y el punto M quedará en equilibrio por la accion simultánea de las tres fuerzas M F, M F′, M R.

Cuando dos fuerzas desiguales obran sobre un mismo punto material, la direccion y tamaño de su resultante se obtiene tambien del mismo modo. Sean M A, M B, fig. 2, las direcciones de estas fuerzas, y M el punto sobre que obran. Tomemos en una y otra las partes M F, M F′, proporcionales á sus intensidades, y por consiguiente desiguales como ellas. Por el estremo F, y F′, de cada fuerza, tírese una recta, paralela á la otra; prolónguense estas rectas hasta que se corten en un punto R, y M R, indicará el tamaño y direccion de la resultante que se busca. Si

esta se coloca sobre la prolongacion de MC en sentido contrario, equilibrará la accion simultánea de las dos fuerzas MF, MF.′ Esta construccion se llama en la estática *paralelógramo de las fuerzas*, y en física es de un uso contínuo.

Del mismo modo que por esta regla se pueden *componer* dos fuerzas en una resultante única, se puede *descomponer* una fuerza dada en otras dos, cuyas direcciones sean conocidas; es decir, se pueden hallar dos fuerzas, que obrando juntas en las direcciones dadas, produzcan el mismo efecto que la primitiva. Sea MA, fig. 3, la direccion de una fuerza dada, aplicada al punto M, y cuya intensidad esté representada por MF, sean MC, MD las dos direcciones en que se la quiere descomponer; no habrá mas que tirar por el punto F las rectas Ff, Ff', paralelas á estas direcciones, y las partes Mf, Mf', representarán las intensidades de las componentes que se deseaban.

Si aplicamos esta construccion á cada una de las fuerzas MF, MF′, de la fig. 2, tomando por direcciones de las nuevas componentes la de la resultante MR, y de una línea perpendicular á ella, como representa la fig. 4, hallaremos en la direccion MR las dos fuerzas Mf, Mφ, que obrando en la misma direccion equivale á una sola, igual á MR; y en el otro sentido tendremos las dos fuerzas Mf', Mφ', que siendo iguales y opuestas se destruyen entre sí. No resulta, pues, de ellas, ningun esfuerzo para mover el punto M, y por consiguiente queda sola la fuerza MR, que por lo mismo es la resultante de las dos fuerzas MF, MF′

Cualquiera que sea el número y direccion de las fuerzas que obran sobre un punto material, se pueden componer en una sola resultante por medio de la regla anterior. Porque considerando separadas dos de las componentes, podrán componerse en una sola resultante; esta podrá componerse con otra de las primitivas, y del mismo modo todas ellas, hasta

que se obtenga una sola y única resultante, que será la de todas las fuerzas propuestas; y aplicándola al punto material, en una direccion contraria á la que la construccion indica, equilibrará á todas las fuerzas. Recíprocamente, dada una fuerza contrária, se la puede considerar como resultante de todas las fuerzas que se quieran, y en las direcciones que se desean, pues tomando la construccion en sentido inverso se la podrá descomponer en todas direcciones.

La resultante de dos fuerzas que concurren en un mismo punto tiene una propiedad que importa conocer, porque es muy fecunda en aplicaciones. Si de un punto cualquiera, C, fig. 5, tomada en cualquier parte de su direccion se tiran las líneas CP, CP′, perpendiculares á las direcciones de las dos fuerzas componentes, los tamaños de estas perpendiculares estan siempre en razon inversa de la intensidad de las fuerzas. Es decir, que si la fuerza MF, por ejemplo, tiene una intensidad representada por 9, siendo la de la fuerza MF′, representada por 5, CP, será á CP′, como 5 es á 9. Esto se demuestra fácilmente en la geometría, pues es una consecuencia de la construccion del paralelógramo, que determina la direccion de la resultante. Se deduce de esta relacion, que si se multiplica la espresion numérica de cada fuerza, por la longitud de la perpendicular que le corresponde, espresada en partes de la unidad lineal, los dos productos son iguales. Por ejemplo, en la fig. 5, en que hemos supuesto la fuerza mayor, MF, igual á 9, y la menor, MF′, igual á 5: la longitud de CP es como 5, y la de CP′ como 9; de suerte, que multiplicando MF por CP, resulta el producto 45; del mismo modo que multiplicando MF′ por CP.′ En general, el producto de una fuerza MF′, por la perpendicular, bajada de un punto cualquiera, C, de su direccion, se llama el *momento estático* de la fuerza, con relacion á este punto. Mas adelante veremos que este pro-

ducto espresa la energía con que la fuerza haria girar á una vara inflexible, CP, perpendicular á su direccion, al rededor del mismo punto, suponiéndole fijo. Esto hace de una grande importancia la valuacion de los *momentos*.

CAPÍTULO IV.

Del equilibrio producido por la composicion de muchas fuerzas aplicadas á diferentes puntos materiales, unidos entre sí de una manera invariable.

Como todos los cuerpos que nos presenta la naturaleza estan compuestos de partes que tienen una estension sensible, no podemos comprobar en ellos por medio de una aplicacion inmediata las leyes que acabamos de descubrir para un solo punto material, aislado en el espacio. Pero era indispensable pasar por esta abstraccion antes de llegar á fenómenos mas complicados, tales como los que presentan muchos puntos unidos entre sí con una mútua dependencia, como son los que realmente componen los cuerpos.

En este caso las fuerzas aplicadas á cada uno de los puntos del sistema no limitan su accion á este solo punto, sino que la transmiten á toda la masa por razon de las condiciones que hacen depender unas partes de otras, ya en las diversas posiciones que pueden tomar, ya en las dilaciones que pueden sufrir. ¿Se trata, por ejemplo, de un cuerpo sólido? Su carácter matemático será que todas sus partes esten invariablemente unidas unas á otras, de modo que no se separen jamas; pues aunque en rigor no existe ningun cuerpo natural que posea esta invariabilidad en un grado absolutamente invencible, sin embargo, se les puede considerar como tales, cuando su contestura resiste á la accion de las fuerzas á que se les espone. Ahora bien, la inflexibilidad que caracteriza un sistema semejante, exije, sin duda al-

guna, que cualquiera de sus partes transmita á las demas la impresion que reciba de una fuerza, puesto que siendo impelida, arrastra á todas las demas en su movimiento. ¿Se trata de un cuerpo líquido? Entonces la impenetrabilidad de las partes que se hallan en contacto es la única cosa que contraría sus movimientos, y arregla la reparticion de las fuerzas aplicadas á cada punto de la masa total. Todas las condiciones de union que puedan imaginarse entre las partes de un sistema material, se reducirán siempre á que algunos de sus puntos habrán de permanecer siempre en superficies ó líneas dadas, ó bien dependerán unos de otros en sus movimientos; de modo, que una de sus partes no podrá cambiar de posicion sin que otra ú otras esperimenten variaciones correspondientes á la primera. Todo esto podria imitarse artificialmente considerando el sistema como compuesto de puntos materiales, primitivamente aislados y libres, pero unidos despues entre sí por medio de cordones mas ó menos flexibles, y segun la naturaleza de los movimientos que se les quisieran dar. Entonces la union que los hace dependientes unos de otros se reducirá á presiones ó tracciones, segun la direccion de estos cordones; el movimiento ó equilibrio de cada punto del sistema se determinará exactamente como si estuviese libre, pero impelido por el conjunto de todas estas fuerzas; y la condicion general del equilibrio ó movimiento de todo el sistema consistirá en que todas las condiciones parciales puedan verificarse simultáneamente y sin contradiccion.

Apliquemos esta doctrina al equilibrio de un sistema rigorosamente sólido, es decir, cuyas partes esten unidas entre sí de un modo invariable; y para limitarnos al caso mas sencillo, consideremos un sistema impelido solo por dos fuerzas, situadas en un mismo plano, y aplicadas á dos de sus puntos. Sean estos, m, m', fig. 6, y mF, m'F', las direcciones y tamaños de las dos fuerzas propuestas. Es claro que

la cuestion quedaria resuelta si pudiésemos hacer concurrir las dos fuerzas en un mismo punto de aplicacion, pues entonces su composicion se efectuaria por nuestra regla general del paralelógramo de las fuerzas. Ahora bien, el punto de aplicacion de una fuerza puede transportarse arbitrariamente á otro punto cualquiera de su direccion, con tal que se suponga este nuevo punto unido al primero por medio de una vara inflexible, que transmita la impresion de la fuerza de uno á otro en virtud de la impenetrabilidad de sus partículas. Siguiendo este principio, prolonguemos las direcciones de ambas fuerzas, mF, m'F', hasta que se encuentren en un mismo punto, M; lo cual debe suceder, pues las hemos considerado situadas en un mismo plano; despues, suponiendo al punto M unido fijamente al sistema, traslademos á él las dos fuerzas, MF, MF', y acabemos el paralelogramo; la diagonal MR será el tamaño y la direccion de la resultante que se busca. Prolonguemos ésta atravesando el cuerpo ó el sistema; y este estará impelido por ambas fuerzas, como lo estaria por la resultante aplicada en cualquier punto de su direccion.

Un caso parece esceptuarse de esta solucion, á saber: aquel en que las dos fuerzas mF, m' F', fig. 7, fuesen exactamente paralelas. Pero como la regla que nos ha servido es lejitimamente aplicable, por pequeño que sea el ángulo que formen las dos fuerzas, con tal que no se le ponga absolutamente nulo, se sigue con arreglo á la ley de continuidad de las determinaciones matemáticas, que aun subsiste en este límite, y que solo es necesario buscar entre sus resultados aquellos que no se desvanecen por sí mismos. Antes hemos dicho, hablando de las fuerzas concurrentes, que si de un punto cualquiera C, fig. 8, tomado sobre la direccion de la resultante CR, se bajan las perpendiculares CP, CP' á las direcciones de las dos componentes, estas perpendiculares estan en razon inversa de las fuerzas; de suerte, que

si la fuerza MF', por ejemplo, está representada por 9, y $M'F$ lo está por 5, CP será á CP' como 5 es á 9. Ahora bien, este resultado es independiente del ángulo mas ó menos agudo que formen las direcciones de las dos fuerzas, y asi es aplicable aun al caso en que sean paralelas. De este modo se determina un punto C de su resultante, pues las distancias CP, CP', fig. 7, de esta línea á las dos fuerzas, deben ser recíprocamente proporcionales á sus intensidades. Por otra parte, el tamaño ó intensidad de la resultante es igual á la suma de las dos fuerzas componentes MF, $M'F'$, segun resulta de la construccion de la fig. 4, pues en este caso las componentes Mf, $M\varphi$, perpendiculares á la direccion de la resultante son absolutamente nulas.

Conociendo de este modo el punto de aplicacion C, fig. 7, de la resultante, su direccion paralela á las fuerzas componentes, y su tamaño igual á la suma de estas, no hay mas que colocar en el mismo punto C una fuerza CR', igual á esta resultante y en direccion contraria, la cual destruirá el efecto de aquella, y por consiguiente el de las dos componentes de que se deriva, y mantendrá el sólido en equilibrio.

Hemos supuesto en la fig. 7, que las dos fuerzas MF, $M'F'$ obran en la misma direccion; pero puede suceder que obren en direcciones opuestas como representa la fig. 9. Entonces la resultante CR es igual á la diferencia de las dos fuerzas dadas, obra en la direccion de la mas enérgica, y tiene su punto de aplicacion C al lado de esta fuerza, y fuera del espacio comprendido entre las dos componentes; de modo que siempre se verifique la ley general de las perpendiculares CP, CP'. Este resultado era fácil de conocer. En efecto, habiendo tirado arbitrariamente una recta PP', perpendicular á las direcciones de las dos fuerzas, considerémoslas como aplicadas á los puntos PP', en que los corta esta recta, lo cual no altera en nada su efecto; señalemos para abreviar

sus intensidades mF, $m'F'$, por las letras F, F'; y suponiendo que F es la mas enérgica, descompongámosla en otras dos que obran en el mismo sentido, y que siendo una de ellas aplicada en el punto P' igual á F', quede la otra igual á F — F', que deberá estar colocada mas allá del punto P. La primera de estas composiciones destruirá el efecto de F', y no quedará mas que la accion de F — F', que será la resultante que se busca; y oponiéndola en sentido contrario destruirá el efecto de las dos fuerzas F, F', y determinará el equilibrio del sistema. Esta resultante, siempre igual á la diferencia de las dos fuerzas, se aleja mas y mas de P, á proporcion que disminuye su valor. En fin, cuando las dos fuerzas son absolutamente iguales, es nula y se separa al infinito; y como esto seria imposible, se sigue, que en este caso no hay ninguna resultante, que es lo mismo que indica solo la consideracion de simetría; porque si las dos fuerzas son absolutamente iguales y opuestas, como representa la fig. 10, no hay razon alguna para que la resultante siga mas bien la direccion de la una que la de la otra; y como no puede seguir ambas á un tiempo, es claro que no seguirá ninguna. Entonces no se podrá poner el sistema en equilibrio con una sola fuerza, y será preciso destruir separadamente el efecto de cada componente por la oposicion directa de una fuerza igual á ella. La misma necesidad habria para poner en equilibrio un cuerpo sólido, á que se aplicasen dos fuerzas que no estuviesen comprendidas en un mismo plano, pues entonces, por mas que se prolonguen estas direcciones, jamas llegarán á encontrarse, y no pudiendo reunir los dos puntos de aplicacion en uno solo, no se podrian reunir las dos componentes en una resultante única, y seria forzoso destruir individualmente sus efectos.

Sabiendo componer dos fuerzas, aplicadas á dos puntos diferentes de un cuerpo sólido, cuando esta operacion es practicable, podemos componer del mis-

mo modo todas las que se quieran; pues basta componer dos, y sucesivamente cada resultante, con una de las fuerzas que quedan, como hemos esplicado tratando de las fuerzas aplicadas á un mismo punto. Por ejemplo, si todas las fuerzas aplicadas son paralelas entre sí, y tienen una misma direccion, llegaremos á obtener una resultante única, igual á la suma de todas las componentes, y que pasará por un punto que nos hará conocer la construccion, en una direccion paralela á la de las componentes. Pero si las fuerzas siendo paralelas obran en direcciones opuestas, buscaremos la resultante particular de cada uno de los dos grupos, y reducido á estas dos resultantes, observaremos si estan en el caso de escepcion que dijimos antes, es decir, si son exactamente iguales. En este caso no será posible sacar de ellas una resultante comun, y habrá que destruirlas individualmente, si se quiere poner al cuerpo en equilibrio; pero si no se verifica esta perfecta igualdad, podremos componer las dos resultantes en una sola, igual á su diferencia, y cuyo punto de aplicacion se calculará por la regla general esplicada; con lo que se podrá mantener el cuerpo en equilibrio, por medio de una fuerza igual y contraria á esta resultante universal.

Limitémonos á este caso; y conocida ya la resultante, supongamos que todas las fuerzas componentes, conservando siempre la misma intensidad, cambian de direccion, permaneciendo, sin embargo, paralelas entre sí, como indica la fig. 11. Entonces tendrán todas ellas una resultante, que será la misma en cuanto á la intensidad, que era anteriormente, y solo habrá cambiado su direccion en el espacio, pues debe ser siempre paralela á las componentes, y por lo mismo atravesará el cuerpo en diferente direccion que antes. Sin embargo, por una propiedad que demuestra el cálculo, todas las líneas determinadas de este modo, concurren en un mismo punto M, llamado por esta razon *centro de las fuer-*

zas paralelas. Como este centro es comun á todas las resultantes, siempre que estas permanezcan las mismas y aplicadas á los mismos puntos, se destruirá su efecto, cualquiera que sea la direccion que tomen, fijando el centro en que todas ellas concurren; asi como no será necesario fijar el centro de las fuerzas, cuando estas no tomen mas que una direccion, bastando en este caso sostener el cuerpo en la direccion de la resultante.

Estos resultados son siempre ciertos, cualquiera que sea el número de fuerzas paralelas, aplicadas á los diferentes puntos de un cuerpo sólido: subsistirian, pues, aun en el caso de que el número de fuerzas fuese infinito. Esto nos conduce á una aplicacion importante. Sabemos que todos los cuerpos que se hallan sobre la tierra son *pesados* ó *graves*, esto es, que abandonados libremente á sí mismos, caen hácia la superficie de la tierra, y cuando estan sostenidos por algun obstáculo fijo, hacen conocer su tendencia á caer por la presion que ejercen contra este obstáculo, que es lo que se llama su peso. La gravedad, pues, que los dirije hácia el centro de la tierra, es una fuerza que penetra su masa, y obra hasta sobre sus menores partículas; puesto que cada una de estas, por pequeña que se la suponga, si estuviese desprendida y abandonada á sí misma en el vacío, caería lo mismo que el cuerpo entero, haciendo para ello exactamente el mismo esfuerzo que hace sin desprenderse de la masa total, como lo acreditan repetidas esperiencias que nos hacen ver que el peso de un cuerpo no varía despues que se le ha dividido.

La direccion en que obra la gravedad está determinada por la de la libre caida de los cuerpos. En cualquier punto de la tierra es perpendicular á la superficie de las aguas tranquilas; y como esta superficie sigue exactamente en todas partes la convexidad del globo, se infiere que la direccion de la gravedad debe ser distinta en cada punto. Pero es-

ta variacion no debe ser sensible sino á grandes distancias, incomparablemente mayores que las dimensiones de los cuerpos que podemos querer examinar; asi, pues, respecto á cada cuerpo en particular, podemos mirar como paralelas las direcciones de las fuerzas que obran sobre sus diferentes partículas, y *verticales*, esto es, perpendiculares á la superficie del agua en el sitio de la observacion. Segun esto, apliquemos á este caso todo lo que hemos demostrado en general relativamente á la aplicacion de las fuerzas paralelas. Los esfuerzos parciales de la gravedad sobre los diversos puntos de un mismo cuerpo formarán una resultante única, que será su peso, y cuya direccion pasará siempre por un mismo punto de su masa, en cualquier sentido que se le ponga, relativamente á la vertical. Este punto ó centro de las fuerzas toma entonces el nombre de *centro de gravedad*, y puede determinarse por las reglas de la geometría, conforme á los principios ya esplicados.

Supongámosle conocido. Si se fija de un modo invariable podrá el cuerpo girar al rededor de él, permaneciendo en equilibrio en cualquiera posicion que se le ponga. Si no es el centro de gravedad el que está fijo, sino otro punto cualquiera del cuerpo sólido, entonces es necesario, y basta para que haya equilibrio, que la recta que une este punto con el centro de gravedad sea vertical, bien se halle este punto encima ó debajo del centro de gravedad; porque siendo el peso del cuerpo una fuerza vertical, cuya direccion pasa por el centro de gravedad, y puede considerarse como aplicada á él, esta direccion pasará por el punto fijo que hemos supuesto, y su esfuerzo comunicado de un punto á otro por las moléculas ríjidas del cuerpo será destruido por la resistencia. Si el centro de gravedad está mas alto que el punto fijo, el cuerpo estará *sostenido*, y si está mas bajo estará *suspenso*.

Por la misma razon, si se considera un cuerpo

pesado M, suspenso por uno de sus puntos de uno de los estremos de un hilo CM, cuyo estremo opuesto esté fijo en un punto C, es evidente que en el caso de equilibrio el hilo estará vertical, y su prolongacion pasará por el centro de gravedad del cuerpo M; porque solo en esta posicion puede la resultante, formada por el peso del cuerpo, transmitirse á través del hilo hasta el punto fijo, y quedar destruida por su resistencia. A este instrumento se da el nombre de *plomada*, y sirve para determinar en cualquier parte la direccion de la vertical, indispensable muchas veces. Tambien se emplea para determinar el centro de gravedad de un cuerpo, suspendiéndole sucesivamente de dos puntos, y trazando cada vez, ideal ó efectivamente, su prolongacion por medio del cuerpo, cuando se haya establecido perfectamente el equilibrio; pues estas dos direcciones deben necesariamente cortarse en un punto, que es el centro de gravedad.

La posicion de este centro en cada cuerpo, no solo depende de su figura, sino tambien del modo con que está distribuida la materia. Hay cuerpos en que esta distribucion está hecha de una manera uniforme, que son los que se llaman *homogéneos*, es decir, cuyas partes son idénticamente semejantes. En este caso basta conocer la forma del cuerpo para determinar la posicion de su centro de gravedad; y si se le divide en porciones de diferente figura, pero de igual volúmen, el peso de todas será exactamente el mismo. Pero podemos concebir, y en realidad existen cuerpos en que la materia no está repartida de una manera uniforme; de suerte, que en unas partes hay mas y en otras menos; en cuyo caso estas diferentes partes no tienen el mismo peso, siendo iguales en volúmen. Estos cuerpos se llaman *heterogéneos*, por oposicion á los otros. La determinacion de su centro de gravedad exije que se conozca el modo con que está repartida en ellos la materia; de donde nace la necesidad de un nuevo carac-

ter llamado *densidad*, entendiéndose por *mas densos* los cuerpos ó partes de un cuerpo que contienen mas materia en el mismo volúmen, y menos densos los que contienen menos. Cuando los cuerpos que se quieren comparar de este modo son de la misma naturaleza, es evidente que sus densidades son entre sí como los pesos de los volúmenes iguales de ambos; pues siendo el peso de un cuerpo el esfuerzo total que hace para caer hácia el centro de la tierra, en virtud de la gravedad que obra sobre todas sus partes; suponiéndolos de igual naturaleza y volúmen, este esfuerzo debe ser proporcional al número total de partículas que contienen, las cuales son igualmente impulsadas por la gravedad; ya esten mas unidas, ya mas separadas. Asi que, siempre que se pueda apreciar exactamente el peso de los cuerpos, se podrá comprobar la constancia de la densidad de un cuerpo homogéneo, dividiéndole en partes mas pequeñas, cuyas densidades se podrán determinar separadamente; y el mismo método, aplicado á los cuerpos heterogéneos, hará conocer las variaciones de la densidad en sus diferentes partes; y en seguida podrá determinarse por medio del cálculo la situacion de su centro de gravedad.

Este modo de comparacion se ha aplicado igualmente á los cuerpos de diferente naturaleza química, suponiendo sus densidades proporcionales á sus pesos, en igualdad de volúmen. Sin embargo, no podemos asegurar que las porciones de estos cuerpos que pesan igualmente, tienen la misma cantidad de materia inerte; pero por fortuna esta incertidumbre no presenta ningun inconveniente á las esperiencias, porque cada sustancia obra siempre de un mismo modo, bajo la influencia de todas las fuerzas motrices que se le pueden aplicar. Por consiguiente, habiendo comparado las energías de sus esfuerzos bajo el influjo de una misma fuerza, la relacion de estas energías será la misma bajo el influjo de cualquiera otra fuerza que como aquella penetre todas sus

partes. Las operaciones prácticas, por cuyo medio se obtienen los pesos y densidades, corresponden indudablemente á la física esperimental, y mas adelante trataremos de los medios mas exactos de efectuarlas; pero las consideraciones abstractas que dan origen á ellas, y la determinacion de los términos que las espresan, pertenecen á la física racional; por lo que las hemos establecido ahora.

La doctrina de los centros de gravedad tiene una aplicacion contínua en las investigaciones esperimentales, y aun en todas las acciones de la vida física. Vamos á indicar algunas de sus consecuencias mas evidentes.

Cuando un cuerpo sólido está colocado sobre un plano horizontal, á que toca en cierto número de puntos, no puede sostenerse en él á menos que todo su peso quede destruido por la resistencia del plano; y como su peso obra en la direccion de la vertical que pasa por su centro de gravedad, es preciso que esta vertical esté dirijida de modo que encuentre el plano en uno de los puntos en que reposa el cuerpó, ó en el espacio que comprenden estos puntos. Asi se sostiene una mesa cuando la vertical tirada por su centro de gravedad pasa por entre sus cuatro pies. El cuerpo del hombre puesto en pie no puede sostenerse si la vertical análoga sale del espacio cuadrangular comprendido entre los contornos esteriores de sus dos pies. Ahora bien, suponiendo que tiene los brazos tendidos y las piernas paralelas, su centro de gravedad se halla con corta diferencia entre las dos caderas; asi es que el equilibrio se conserva en esta posicion mejor que en ninguna otra que el cuerpo pudiera tomar. La firmeza será mucho menor colocando las piernas una detrás de otra y los pies en una misma línea; por eso es tan difícil mantenerse en esta posicion; y al contrario, cuando quiere asegurarse sobre los pies se separan uno de otro paralelamente, para aumentar el espacio que contienen. De este principio nacen to-

dos los movimientos que se ejecutan para enderezarse cuando se va á caer, dirijiéndose todos á colocar la vertical del centro de gravedad en el espacio en que puede verificarse el equilibrio. El arte peligroso de los volatineros estriva en esta misma teoría.

CAPÍTULO V.

Del equilibrio en las máquinas simples.

Los principios que acabamos de esponer sobre la composicion de las fuerzas bastan para esplicar y calcular el uso de muchas máquinas empleadas á cada instante en las artes y en las investigaciones esperimentales: vamos á esplicar las simples, cuya combinacion componen todas las otras.

De la palanca.

Se llama en general *palanca* una barra inflexible, recta ó curva, como mm', fig. 13, que tiene fijo uno de sus puntos C, ofreciendo un *punto de apoyo*, al rededor del cual puede girar libremente la palanca. Fácilmente se concibe que dos fuerzas mF, m'F′, aplicadas en los estremos opuestos de la palanca, pueden obrar una sobre otra por medio de su inflexibilidad, y combatirse mútuamente estrivando en el punto de apoyo. Cuando la palanca es recta, fig. 14, y las direcciones de las fuerzas son perpendiculares á ella, cada una de las distancias Cm, Cm', comprendidas entre el punto de apoyo, y el punto de aplicacion de las fuerzas se llama brazo de palanca de la fuerza correspondiente. El objeto de la palanca, y en general de toda máquina, es el de emplear cierta fuerza de que se puede disponer, y se llama *potencia*, para equilibrar ó vencer otra fuerza llamada *resistencia*, haciendo obrar una sobre otra por los cuerpos intermedios de que la

máquina se compone, y el cálculo de esta consiste en determinar la relacion que debe haber entre la potencia y la resistencia para que se equilibren mútuamente. La ventaja consiste en poder obtener el equilibrio, empleando una potencia inferior á la resistencia que hay que vencer, disponiendo las cosas de modo que la resultante de estas dos fuerzas venga á dirijirse y aniquilarse contra los puntos fijos de la máquina.

Aplicando esta consideracion á la fig. 13, que es el caso mas general de la palanca, se ve desde luego que nunca podrá haber equilibrio entre la potencia mF y la resistencia m′ F′ si las direcciones de las dos fuerzas no se hallan en el mismo plano; pues para que puedan tener una resultante única es necesario que lleguen á encontrarse; lo que no se verificará si se hallan en diferentes planos. En este caso la palanca, impulsada por la accion de las dos fuerzas, girará al rededor de su punto de apoyo C.

Si las dos fuerzas se hallan en un mismo plano, prolongaremos sus direcciones hasta que se encuentren en un punto M; su resultante debe pasar necesariamente por este punto, y no faltará mas para obtener el equilibrio que hacer que pase por el punto de apoyo C. Luego si se tiran desde este punto dos perpendiculares CP, CP′, á las direcciones de las fuerzas, estas perpendiculares deberán estar en razon inversa de las fuerzas, y cada fuerza multiplicada por la perpendicular bajada sobre su direccion deberá darnos el mismo producto que la otra. Esta condicion, unida á la del concurso de las fuerzas en un mismo plano, bastará para que la palanca esté en equilibrio.

Cuando las dos fuerzas son paralelas entre sí, como en la fig. 14, la condicion del plano se verifica por sí misma; y si la palanca es recta, la segunda se reduce á que la energía de las fuerzas esté en razon inversa de sus brazos de palanca; ó lo que es lo mismo, que los productos de cada fuerza por su brazo de palanca sean iguales. Hemos dicho antes

que este producto se llama el *momento estático* de la fuerza; su valor es el que determina el equilibrio; y como se le puede hacer crecer indefinidamente, aumentando la longitud del brazo de palanca, que es uno de sus factores, se vé por qué una pequeña fuerza, aplicada al estremo del brazo mas largo de una palanca puede equilibrar á una resistencia mucho mayor que ella.

En ambas figuras hemos supuesto el punto de apoyo colocado entre las dos fuerzas; pero podria suceder que cayese fuera de este espacio, como en las fig. 15 y 16. Entonces es necesario para que haya equilibrio que los momentos estáticos de ambas fuerzas, relativamente al punto de apoyo C, sean iguales entre sí.

Algunas veces se llama palanca de *primer género* aquella en que el punto de apoyo cae entre las dos fuerzas, como en las fig. 13 y 14; palanca de *segundo género*, la de la fig. 15, en que el punto de apoyo cae fuera de la direccion de las dos fuerzas, suponiendo la potencia mas distante del punto de apoyo que la resistencia; y en fin, palanca de *tercer género* á la que tiene la misma disposicion del punto de apoyo, fig. 16; pero suponiendo la resistencia mas distante que la potencia. Es evidente que este género no produce ninguna ventaja, pues la potencia se disminuye por su proximidad al punto de apoyo. En el dia son ya muy poco usadas estas determinaciones.

De la polea.

La polea es un círculo sólido, ordinariamente de madera ó metal, en cuya circunferencia hay una garganta ó carril que se llama *cajera*, y que está atravesado en su centro C, fig. 17, por un eje perpendicular á sus superficies planas. Si este eje está fijo, la polea no puede hacer otra cosa que girar al rededor de él, y toma el nombre de polea fija; pero hay casos en que el eje no está fijo, y la po-

lea puede moverse en el espacio, al mismo tiempo que da vueltas sobre su eje, y se llama *polea movible.* Empecemos por el primer caso, y supongamos que por la garganta ó canal de la polea pasa una cuerda perfectamente flexible, de cuyo estremo F tira la potencia MF, y del opuesto F′ la resistencia M′F.′ Es claro, que esta máquina no es mas que una palanca, cuyos brazos son los radios CM, CM′, tirados desde el centro perpendicularmente á las dos partes de la cuerda FM, M′F′. Como estos brazos son iguales, es preciso para que haga equilibrio que la potencia y la resistencia sean iguales; entonces la resultante de estas dos fuerzas pasa por el centro de la polea, y es destruida por la resistencia del eje; por consiguiente, si estas fuerzas son paralelas, como en la fig. 18, el eje sufre el esfuerzo de la suma de ambas.

Consideremos ahora, fig. 19, una polea CMM′, enteramente libre, á quien rodee una cuerda C′M′MF, cuyo estremo C′ esté fijo en este punto de un modo invencible, tirando del otro la potencia MF. Si se une al eje C de la polea un peso, ó en general una resistencia cualquiera en la direccion CR, es claro que esta resistencia se podrá equilibrar por la accion combinada de la fuerza MF, y de la resistencia del punto fijo. Para valuar los efectos de esta combinacion es preciso concebir que transmitiéndose hasta el punto C′, la accion de la fuerza FM sobre el cordon, este sufrirá una fuerza doble, como sucederia si en el punto fijo hubiera otra fuerza igual á MF. Su disposicion, pues, es la misma que en la fig. 17; y asi como en aquella el eje sufria el esfuerzo de la resultante, en esta le sufrirá la resistencia CR. Si esta es vertical, é igualmente la fuerza MF, fig. 20, el cordon M′C′ estará tambien vertical, y en el caso de equilibrio la traccion en MF deberá ser la mitad del peso ó resistencia CR. Si es mas enérgica, hará subir este peso, suponiendo siempre la cuerda perfectamente flexible, y que en la máquina no haya ningun

otro obstáculo fisico que se oponga al movimiento.

Combinando asi unas encima de otras varias poleas, cada una de las cuales se considera como apoyo fijo de la que está debajo de ella, se forman aparatos muy útiles para levantar grandes pesos con fuerzas pequeñas, tales como el de seis poleas que representa la fig. 21. Este método proporcionaria el disminuir indefinidamente la potencia si la rigidez de las cuerdas, y el roce que sufren en las gargantas no opusiesen nuevos obstáculos al movimiento.

El torno representado en la fig. 22, que sirve igualmente para elevar grandes pesos, puede considerarse como una máquina formada por dos poleas de diferente tamaño, sostenidas por un eje comun; de las cuales, la mayor sirve para hacer obrar la potencia, y la menor la resistencia que hay que vencer. Es necesario, pues, para que haya equilibrio, que estas dos fuerzas esten en razon inversa de los radios de las poleas en que obran, pues que estos son sus brazos de palanca.

Del plano inclinado.

Cuando una fuerza ha de sostener enteramente á un cuerpo grave abandonado á sí mismo, es preciso que sea igual al peso de este. Pero si el cuerpo puede dejar parte de este peso en un obstáculo fijo, es claro que se le puede acabar de sostener con una fuerza menor; tal es el efecto del plano inclinado, representado en la fig. 23.

Sea AB este plano, inclinado en efecto al horizonte, de modo que AB sea su base, y BD su altura: supongamos que se ha colocado encima de él un cuerpo sólido *abcd*, que descansando sobre su base *ab* pueda bajar libremente á lo largo del plano por efecto de su gravedad. Si queremos calcular la fuerza necesaria para contenerle, tiraremos por su centro de gravedad G una línea vertical GR, para representar el efecto total de la gravedad, que pue-

de considerarse como aplicado á este punto. Despues por medio del paralelógramo de las fuerzas descompondremos esta resultante en dos componentes, una GF, perpendicular al plano fijo, y la otra GF′, paralela á su superficie. Es claro que la primera quedará destruida por la resistencia que la opone este plano. El cuerpo, pues, bajará en virtud de la fuerza GF′; y por consiguiente bastará equilibrar esta fuerza para sostenerle. Asi la potencia que habrá de aplicarse será al peso total del cuerpo, como el lado GF′ á la diagonal GR; ó lo que es lo mismo, como la altura del plano á su longitud; por consiguiente bastará una potencia tanto menor cuanto mas suave sea la inclinacion del plano.

Esto nos ofrece un medio de subir un peso á una altura cualquiera por medio de una fuerza menor que él, haciéndole subir por un plano inclinado; y para que el peso no se separe horizontalmente á una distancia considerable, se puede hacer volver el plano al rededor de un eje vertical, como los caminos que suben al rededor de las montañas. Tal es precisamente la constitucion de la *rosca*, que no es otra cosa que un plano inclinado, formado al rededor de un cilindro vertical, fig. 24. Para servirse de ella se construye un conducto EE, que se llama *tuerca*, cortado exactamente con las mismas dimensiones que la rosca; pero con la diferencia, que la tuerca tiene en hueco lo que la rosca en relieve, y al contrario. Se adapta la tuerca á un obstáculo fijo, y dando vueltas á la rosca por medio de una palanca que la atraviesa perpendicularmente á su eje, se producen grandísimos efectos en la direccion longitudinal de este mismo eje. De este modo se puede empujar ó tirar con una gran fuerza. Se emplea comunmente esta máquina para apretar juntas dos piezas separadas, fig. 25. Para esto se hace en una de las piezas AB un agujero bastante ancho para que pueda pasar la rosca; pero de modo que no pueda pasar su cabeza, que se ha dejado mas gruesa á propósito. La

otra pieza A′B′ tiene una tuerca, por la que se hace marchar la rosca; y cuando la cabeza de esta llega á la primera pieza, la aprieta contra la tuerca con toda la fuerza que se emplea para hacerla volver. Parece que esta opresion no deberia subsistir sino en tanto que se continúa haciendo fuerza sobre la rosca; pero no es asi: si la tuerca está justa, como siempre se procura que esté, el contacto de sus superficies interiores con las de la rosca forman un roce y una adherencia tal, que no dejan á la rosca volver sobre sí misma, aun cuando se la vuelva, é impiden que las piezas unidas puedan separarse.

Todas las condiciones de equilibrio que acabamos de establecer estan calculadas en la suposicion matemática de que la transmision de la fuerza se hace libremente por medio de todas las piezas que componen una máquina, sin tener que vencer mas resistencia que la que hemos considerado especialmente. Pero cuando se trata de aplicar prácticamente estos resultados se encuentran diferentes obstáculos, inherentes á la constitucion fisica de los cuerpos de que se hace uso, y que introducen nuevos elementos en las condiciones del movimiento y del equilibrio. Asi, las cuerdas que suponiamos perfectamente flexibles adqnieren rigidez, y no se doblan con una entera libertad; las barras que hemos supuesto perfectamente inflexibles, ceden mas ó menos; las superficies que se tocan, y que suponiamos se escurrian sin obstáculo unas sobre otras, contraen cierta adherencia, que es preciso vencer para que se desunan; y cuando ha comenzado el movimiento sufren un roce mas ó menos enérgico que le detiene, y acaso le aniquila. Las palancas nó giran libremente sobre el punto de apoyo, ni las cuerdas en las gargantas de las poleas, ni las roscas dentro de las tuercas; y es preciso tener en consideracion todas estas circunstancias para obtener las condiciones reales del movimiento ó del equilibrio. Pero como no pertenecen á la mecánica abstracta, sino que depen-

den de la constitucion física de los cuerpos, sola la esperiencia puede estudiarlas, y valuar su influencia para hacerlas entrar en consideracion en los cálculos. Por consiguiente son otros tantos puntos que deberán ocupar nuestra atencion en el curso de esta obra.

CAPÍTULO VI.

Del equilibrio de los líquidos incompresibles.

Del mismo modo que para imitar los cuerpos sólidos que nos presenta la naturaleza hemos imaginado sistemas materiales compuestos de moléculas unidas entre sí de un modo invariable, para figurar los cuerpos líquidos concebiremos sistemas, cuyas moléculas esten perfectamente libres y capaces de moverse independientemente, sin que puedan condensarse por efecto de ninguna presion. Esta movilidad es en efecto el carácter mas evidente que nos ofrecen los líquidos naturales no viscosos, como por ejemplo, el agua, el alcohol &c. En cuanto á su incompresibilidad, aunque acaso no sea absoluta, sin embargo, es tal, que ninguna presion conocida los hace reducir sensiblemente. Asi que, manifestando la influencia que estas propiedades deben tener sobre el equilibrio de semejantes sistemas, prepararemos, sin duda, las leyes que la esperiencia deberá confirmar.

La primera que se deduce inmediatamente, es que una molécula líquida, colocada ya en la superficie, ya en el interior de la masa entera, debe ceder á la menor fuerza que obre en ella, y moverse segun su direccion, á menos que no sea detenida por una fuerza contraria ó por un obstáculo invencible. Mas no debe inferirse de aqui que un líquido no puede estar en equilibrio, á menos que la resultante de las fuerzas que obran sobre sus diferentes partes no sea nula para cada una de ellas; porque si el líquido está encerrado en un vaso, cuyas pare-

des sean sólidas, las moléculas, apoyándose unas en otras pueden transmitir hasta las paredes las fuerzas que las impelen, en virtud de su impenetrabilidad y de su incompresibilidad, quedando asi en equilibrio por la resistencia que aquellas oponen. Si por el contrario el líquido está libre por todas partes, como lo estaria un planeta fluido, aislado en el espacio, el equilibrio puede aun verificarse por medio de presiones y atracciones ejercidas desde afuera á dentro sobre las moléculas de la superficie, que trasmitiéndose igualmente á las partículas del interior irán á destruir las fuerzas que les impelen. Por lo demas, cualquiera que sea el modo con que existe el equilibrio en una masa líquida, si consideramos una partícula cualquiera de las que componen esta masa, su equilibrio no se alterará substituyendo á una ó muchas de las que la rodean otros tantos puntos sólidos, sostenidos fijamente en el líquido, y contra los cuales vengan á destruirse las presiones que sufra la primera molécula. Seria indiferente que estos puntos fijos fuesen independientes entre sí, ó estuviesen ligados de un modo cualquiera, y su substitucion puede hacerse segun convenga en cualquiera parte del líquido. De aqui resulta esta importante consecuencia: si estando en equilibrio una masa líquida se concibe en su interior un canal de cualquiera figura, terminado por paredes sólidas, y cerrado por sus estremidades, ó entrante en sí mismo, las moléculas líquidas contenidas en este canal deberán estar tambien en equilibrio separadamente, en virtud de las fuerzas que obran sobre ellas, y de las reacciones que sufren de parte de sus paredes. Si la masa fluida en equilibrio está terminada por alguna superficie descubierta, deberá suponerse abierto el canal ideal en los sitios en que viene á salir á esta superficie, pues mas allá no hay ninguna resistencia que representar. Este principio, fundado como se ve únicamente sobre la consideracion de la independencia de las partes constituyentes de los líquidos, tiene la

ventaja de reducir la investigacion de las condiciones del equilibrio de una masa entera al caso mas sencillo de todos, á saber, el equilibrio del líquido contenido en un canal infinitamente estrecho.

Esto supuesto, tratemos de determinar sus condiciones, suponiendo el líquido pesado; homogéneo, y contenido en un tubo cilíndrico ABCD, fig. 26, cuya parte inferior BC sea horizontal, y las otras dos BA y CD ambas verticales y abiertas por el estremo superior. Es evidente, sin mas que la razon de simetría, que para que haya equilibrio deberá mantenerse el líquido en ambos brazos á igual altura; pero esto mismo lo podremos conocer considerando que cuando el líquido se halla á igual altura la porcion horizontal del líquido BC está comprimida en ambos estremos por dos fuerzas iguales (que son los pesos de las dos columnas líquidas de igual altura); de suerte, que no tiene ningun movimiento á derecha ni á izquierda; lo cual no sucederia si se pusiese mas líquido en uno de los dos brazos; porque entonces, siendo mayor la presion de este lado, la porcion del líquido que estaba horizontal seria impelida hácia el lado opuesto; movimiento que podria verse si esta porcion de líquido fuese de distinta naturaleza que el resto, é incapaz de mezclarse con él; por ejemplo, de mercurio, si las columnas verticales eran de agua. Pero volviendo al caso del equilibrio producido por la igualdad de presion de las dos columnas de la misma naturaleza, podria suplirse una de estas presiones sustituyendo á la columna líquida que la ejerce la resistencia de un fondo sólido, vertical ó inclinado, que terminase el tubo en B, fig. 27 y 28. Entonces la presion de la otra columna se trasmitiria á este fondo por medio de las moléculas líquidas, y en virtud de su impenetrabilidad; de suerte, que estando vertical sufriria todo el peso de la columna CD, como si estuviese colocada inmediatamente sobre él; y si tuviese una direccion inclinada al horizonte de una ma-

nera cualquiera esperimentaria una presion igual al peso de una columna líquida que tuviese su superficie por base y CD por altura. Esta trasmision de la presion, y su valor respecto á la oblicuidad del fondo B, puede verificarse por la esperiencia, sustituyendo á este fondo un embolo movible, y midiendo la fuerza necesaria para evitar que sea arrojado del todo. Pero la ley que resulta de aqui no se verifica solo respecto al peso de la columna CD, sino respecto á cualquiera fuerza que se quiera suponer, aplicada perpendicularmente en D sobre la superficie libre de la columna. La presion producida por esta fuerza se trasmitiria igualmente sin alteracion por medio de las moléculas fluidas á todas las superficies sólidas que limitan esta masa; y si cada centímetro cuadrado de la superficie libre estuviese oprimida por el peso de un kilógramo, cada centímetro cuadrado del fondo B y de las paredes del canal sufriria igualmente una presion de un kilógramo perpendicular á su superficie. En esto consiste el principio general de hidrostática, conocido con el nombre de *igualdad de presion*; y puede verificarse, como acabamos de decir, por medio de esperiencias seguras. Se ha aplicado este principio ingeniosamente á la construccion de una máquina muy usada en Inglaterra, en la que la presion ejercida por medio de una palanca sobre la superficie de un canalito fluido pasa con el lleno de su energía á todos los puntos de una gran superficie. Uniendo este principio al que hemos deducido antes de la independencia de las moléculas en los líquidos, podemos descubrir todas las condiciones del equilibrio de su masa.

Consideremos, por ejemplo, las partes de esta masa, limitadas por una superficie libre y sin paredes; aislémoslas de todas las otras por medio de un canal infinitamente sutil, A B A′ B′, fig. 29, que siga los contornos de la superficie libre, y se termine por dos fondos sólidos A A′ B B.′ El equilibrio deberá existir en este canal como en cualquiera otra

parte. Pero la libertad en que se se halla la superficie exije que la pared esterior AB no sufra ninguna presion de dentro á fuera: es, pues, necesario, ó que los puntos de la superficie libre no se hallen comprimidos, ó que lo esten solo de fuera á dentro, y todos con igual energía; ademas, será tambien necesario que la resultante de todas las fuerzas que obran sobre las partículas líquidas de esta superficie esté dirijida de modo que no las haga escurrir en la direccion de la longitud del canal; y esta condicion no puede verificarse á menos que la resultante de que se trata no sea perpendicular á la superficie libre. Por ejemplo, si el líquido está únicamente impelido por una fuerza de gravedad que tiende hácia un centro, y que es igualmente intensa por todas partes del espacio, la superficie libre deberá tomar la forma de una esfera concéntrica al punto á que se dirije la gravedad. Tal seria el caso en que estaria el mar, suponiendo que la tierra que cubre no girase sobre sí misma. Pero si el centro está á una distancia muy grande comparada con la estension de la superficie libre, las direcciones de la gravedad respecto á sus diferentes puntos pueden considerarse como paralelas, y la superficie será un plano perpendicular á esta direccion comun. Tal es el caso de los líquidos pesados contenidos en vasos; y en efecto, se observa que su superficie libre es plana y horizontal. Ademas de esto, si estan colocadas en el vacío, la presion en esta superficie es nula, porque no teniendo nada sobre sí, las partículas situadas en ella solo son impelidas por su propia pesantez, que es igual en todas; pero si el líquido está situado en la atmósfera, como la masa de aire que está sobre él es pesada, segun veremos despues, la superficie libre del fluido sufre todo su peso; mas siendo esta superficie horizontal, la presion sobre todas sus partes es constante, y el equilibrio se verifica igualmente.

Para mayor sencillez volvamos á considerar el

caso; en que colocado el fluido en el vacío, no es impelido mas que por su misma gravedad, y suponiendo que esté contenido por las paredes sólidas de un vacío, penetremos en su interior. Este caso, aislando una partícula cualquiera, M, fig. 30, es evidente que esta partícula puede considerarse como situada en el fondo de un canal vertical, terminado en la superficie libre: sufre, pues, todo el peso de la columna líquida situada sobre ella, y trasmite esta presion en todos sentidos á las partículas que la rodean, las cuales resisten con igual fuerza en virtod de la reaccion de las paredes. La igualdad de presion en todos sentidos se verifica; pero la intensidad de la presion aumenta proporcionalmente á la profundidad. Lo mismo sucede respecto á la que sufren las paredes del vaso. Para formarnos una idea exacta de esto elijamos un pequeño elemento, BB, de su superficie, situado á cierta profundidad; dirijamos mentalmente desde este punto un canalito horizontal BC, que encorvándose despues verticalmente venga á terminar en D en la superficie libre. Entonces el elemento BB, considerado como fondo de este canal, sufrirá una presion normal, igual al peso de una columna del líquido, cuya base fuese la superficie BB y su altura CD; y por consiguiente el vaso reventará si la pared no tiene en el punto B la fuerza necesaria para resistir á esta presion.

Si la direccion de la superficie BB no es absolutamente horizontal, descomponiéndose horizontalmente la presion normal, dará origen á una fuerza, que procurará imprimir al vaso un movimiento de translacion en la direccion CB. Sin embargo, este movimiento no se verifica jamas en los vasos que tienen una parte llena de líquido, y estan suspensos libremente; porque hay siempre un elemento opuesto B′B′, situado á la misma altura que BB, y que por lo mismo sufre una tendencia igual en sentido contrario; de suerte, que todos estos esfuerzos opuestos repartidos al rededor del vaso se destruyen mú-

tuamente. Pero si se hace un agujero en uno de sus puntos, como por ejemplo, B B ó B′B′, entonces no siendo la presion en este punto sostenida por la pared, la presion en el lado opuesto obra sola, y empuja el vaso y el líquido en la direccion que le corresponde. Esto mismo confirma la esperiencia, y aun Daniel Bernouilli propuso este medio para hacer mover los barcos.

Si de las paredes laterales del vaso pasamos á su fondo, calcularemos la presion ejercida en él del mismo modo, dependiendo únicamente respecto á cada punto de su profundidad bajo la superficie libre; luego si el fondo es horizontal todos sus puntos sufrirán igual presion, y la total que esperimentará el fondo será igual al peso de una columna líquida, cuya base sea su superficie, y la altura su distancia á la superficie libre del líquido. La configuracion de las paredes laterales no influye nada en esta valuacion; y por consiguiente es la misma siendo el vaso cilíndrico, como en la fig. 30, ó siendo cónico, ya sea mas ancho por arriba, como en la fig. 31, ó ya mas estrecho, como en la 32. En todos estos casos, siendo la misma la naturaleza del líquido, su altura y la estension del fondo, es igual la presion total ejercida sobre este último.

Resulta de aqui una consecuencia que parece paradóxica, á saber, que en un vaso mas estrecho por la parte superior que por la inferior, la presion ejercida sobre el fondo es superior al peso total del líquido contenido en el vaso; y aun puede ser estraordinariamente mayor elevando sobre una base ancha un canalito estrecho del fluido, como representa la fig. 33. Sin embargo, si se pesa un vaso semejante con el líquido que contiene, solo se nota el peso efectivo de uno y otro; y por grande que sea la presion que sufra el fondo nada añade á este peso total; lo que resulta de que esta presion se halla contrabalanceada en el todo del sistema por las presiones ejercidas sobre las paredes del vaso en sen-

tido contrario. Por ejemplo, si en el vaso ACD, fig. 34, que es mas ancha por la parte de abajo, consideramos dos elementos de sus paredes, tales como B y B′, situados en una misma vertical, iguales en superficie y mirándose uno á otro, y hacemos salir de cada uno de ellos un pequeño canal, que siendo al principio horizontal se encorve despues en direccion vertical hasta la superficie superior del líquido, cada uno de estos elementos sufrirá la presion ejercida por la columna líquida contenida en la parte vertical de su canalito; pero por su contraria disposicion al punto B será impelido de abajo arriba, y B′ lo será de arriba abajo. No quedará, pues, otro esfuerzo para hacer mover el vaso que la diferencia de estas dos presiones, es decir, el peso de la columna líquida BB′ comprendida entre los dos elementos, que es lo que se halla en efecto pesando el sistema. Para mayor sencillez hemos considerado aqui paredes planas y directamente opuestas una á otra; pero la misma compensacion se verificaria respecto á paredes curvas, como se demuestra por el cálculo; lo cual es enteramente análogo á la destruccion mútua de las presiones horizontales. Esta demostracion esplica, como se ve, todo lo que parecia estraordinario á primera vista en la desproporcion del peso de los líquidos con la presion que ejercen sobre el fondo de los vasos en que estan encerrados, pues la presion y el peso absoluto son cosas muy diferentes. Esta propiedad ha servido para construir máquinas, cuyo objeto es comprimir igual y fuertemente grandes superficies por la sencilla elevacion de un canalito líquido.

Conviene observar aqui, que esta presion que varía con la profundidad, depende de la gravedad que obra sobre todas las capas ó secciones horizontales del líquido; y que en general, en un líquido, cuyas moleculas sufren todas igualmente la accion de una fuerza cualquiera, no hay mas presion variable que la que proviene de esta fuerza. Porque

si ademas algunas partes de la superficie libre del líquido sufren otra presion separada, esta se comunica igualmente á todos los puntos del interior y de las paredes; de suerte, que la presion total se compone de esta porcion constante y de la primera que es variable. Tal es, por ejemplo, la especie de equilibrio de una masa fluida, que ademas de su propia gravedad, sufre la presion del peso de la atmósfera.

Hemos supuesto hasta aqui que todas las partes de la masa líquida tienen igual densidad. Si ahora queremos considerar diferentes líquidos contenidos en vasos que se comuniquen, y de tal naturaleza que no puedan mezclarse, no tendremos mas que hacer que dar á las columnas verticales que deben equilibrarse alturas recíprocamente proporcionales á las densidades; con lo cual se verificarán todas las condiciones del equilibrio, como en el caso de un solo fluido; de donde se infiere, que si dos líquidos diferentes se equilibran en los dos brazos de un sifon, ABCD, fig. 35, las alturas verticales de las dos columnas estarán en la razon que acabamos de indicar.

En todas estas aplicaciones hemos considerado las moléculas líquidas como únicamente impelidas por la gravedad; pero si otras fuerzas se unen á esta para obrar sobre ellas, es evidente que variarán los resultados, y que habrá nuevas condiciones de equilibrio propias de estas diferentes suposiciones, como se verifica efectivamente cerca de las paredes de los vasos, á causa de la afinidad que las materias de que se componen suelen ejercer sobre las moléculas del líquido, y siempre por razon de la que estas ejercen entre sí. Esta es la causa, como veremos despues, de la falta de horizontalidad de las superficies líquidas junto á los bordes de los vasos, su ascension y depresion fuera de nivel en los tubos muy delgados, y otra multitud de fenómenos análogos, á los que se ha dado el nombre de *capilares*. Mas adelante esplicaremos lo que la esperiencia y el cálculo nos han hecho conocer acerca de sus leyes generales.

CAPÍTULO VII.

Del equilibrio de los fluidos aeriformes.

Los fluidos aeriformes, tales como el aire, y los otros gases que nos presenta la naturaleza, se diferencian de los líquidos por dos caractéres, la espansibilidad y la compresibilidad. Son espansibles, es decir, procuran sin cesar estenderse en los espacios libres ó limitados en que se encuentran, como si existiese en sus partículas un principio repulsivo que las hiciese huir recíprocamente; y son compresibles, es decir, que la misma masa puede, sin dejar de ser gaseosa, condensarse en un volúmen menor por medio de presiones esteriores, mas fuertes que su tendencia actual á la espansion; tendencia que, respecto á un mismo gas, varía segun su densidad y segun los grados de calor ó frio que esperimenta, que es lo que se llama su *temperatura*. La posibilidad de esta condensacion no es infinita, pues sin duda alguna cesaria cuando las partículas gaseosas llegáran á tocarse; pero la esperiencia nos prueba que las presiones que podemos producir estan muy lejos de obtener este resultado; ni aun existe un gas que podamos reducir por medio de la presion al estado de líquido; estado en que las moléculas estan aun verosimilmente muy separadas. Ademas de las particularidades que hemos dicho, los gases, como todas las demas sustancias materiales, estan sujetos á la gravedad. Es preciso, pues, tener cuidado con todas estas propiedades en las investigaciones que hagamos acerca de las leyes de su equilibrio.

Esto supuesto, consideremos una masa gaseosa, contenida por todas partes, por las paredes sólidas de un vaso, y abandonada á sus propios esfuerzos; es evidente desde luego, que se estenderá por todas partes, llenará enteramente el vaso, y comprimirá las paredes de dentro á fuera, con la fuerza de es-

pansion correspondiente á su volúmen, á su densidad, y en general, á su estado presente. Ademas como las capas inferiores sufren el peso de las superiores, se comprimirán mas, bajo esta presion, y habrá una disminucion de densidad de abajo arriba en toda la altura del vaso, lo cual hará variar la presion entre sus paredes, tanto la que proviene de la pesantez del gas, como la que nace de su resorte, pues este varía con la densidad. Sin embargo, en una pequeña masa de gas, esta diferencia de presion será muy corta, y ordinariamente insensible, á causa de la pequeñez del peso relativamente á la fuerza de espansion. En tal caso, si se agujerean las paredes del vaso en cualquier sitio, y se aplica á la abertura un embolo movible, una válvula ú otro mecanismo á propósito para medir la presion de dentro á fuera, se hallará que esta es sensiblemente la misma en toda la estension de las paredes del vaso, es decir, que cada mitad de superficie, por ejemplo, cada milímetro cuadrado, sufre una presion igual donde quiera que se halle. Ademas, si se disponen de este modo muchos embolos, que penetrando en la masa gaseosa la compriman con una fuerza determinada, la presion producida por cualquiera de ellos, se comunicará sin mas alteracion á todos los otros por medio de la sustancia gaseosa, como hemos visto que se verifica en los líquidos, de suerte que esta propiedad que constituye el principio de igualdad de presion, es igualmente aplicable á los gases.

Ahora bien, si volvemos á considerar en general el equilibrio de una masa gaseosa, espansible, compresible y pesada, podemos dar á esta investigacion la misma sencillez que hemos dado á la de los líquidos, esto es, podemos hacer depender el equilibrio de la masa entera desde un canal de cualquier forma, entrante en sí mismo, ó cerrado por sus estremos: porque la resistencia que entonces ofrecia la incompresibilidad del líquido, está aqui reemplazada por la reaccion elástica de las partículas, y se puede sin al-

terar el equilibrio, substituir tanto á una como á otra la resistencia de puntos fijos ó paredes sólidas, que se deberán igualmente suponer sin fuerza en los sitios en que la masa gaseosa esté determinada por una superficie libre. De aqui inferiremos, que en el equilibrio de los gases, como en el de los líquidos, la presion en la superficie libre debe ser nula ó constante, y dirigida de fuera á dentro; y que ademas la forma de esta superficie debe ser en cualquier parte normal á la resultante de las fuerzas que obren sobre las partículas contenidas en ella. La primera condicion no podria verificarse en las sustancias gaseosas que nos ofrece la naturaleza, si las leyes de su espansibilidad indefinida fuesen vigorosa é invariablemente lo mismo que se nos ofrecen en los límites de condensacion, rarefaccion y temperatura á que pueden llegar nuestras esperiencias. Nosotros hallamos que el resorte ó fuerza de espansion de un gas nunca llega á ser nulo, por débil que se suponga su densidad; sin embargo, es preciso que haya circunstancias desconocidas, que pongan un límite á esta espansibilidad, pues la atmósfera terrestre, por ejemplo, aunque aislada en el vacío de los cielos no se disipa, y acompaña á la tierra en su curso participando de todos sus movimientos. Acaso el frio escesivo que existe en las regiones mas elevadas de la atmósfera, como veremos en otra parte, altera la constitucion de sus últimas capas, destruyendo asi su tendencia á la espansion, pues si solo la gravedad contuviese las últimas partículas atmosféricas, equilibrando su resorte, simplemente debilitado, deberian moverse al rededor de la tierra como otros tantos satélites, en lugar de girar en veinte y cuatro horas como parte de ella.

Si de la superficie, libre ó no, pasamos á las capas interiores, las condiciones de su equilibrio serán las mismas que las de una simple columna gaseosa que se estendiese de alto á bajo en toda la masa. Si para mayor sencillez suponemos este canal cerrado

por la parte inferior, las capas sobrepuestas se comprimirán como dijimos antes, en virtud de su propio peso, y la variacion de su densidad, dependerá del modo de aumentarse su resorte á medida que se comprimen. Será preciso tambien contar con todas las causas que pueden modificar la energía de este resorte, como el frio, el calor y la naturaleza de los vapores que pueden mezclarse. La complicacion de tantas causas, cuya influencia no podemos conocer siempre exactamente, hace que las condiciones reales del equilibrio de las capas atmosféricas sean muy difíciles de fijar, y que no se puedan obtener sino aproximadamente, suponiéndolas unas constituciones bastante regulares para poder someterlas al cálculo, y bastante aproximadas á la realidad, para que sus consecuencias sean conformes á la observacion en la parte que podemos verificarlas, resultado á que se llega principalmente por medio de dos preciosos instrumentos, que daremos á conocer luego, llamados el barómetro y el termómetro.

CAPITULO VIII.

Condiciones del equilibrio de los cuerpos sólidos, sumergidos en los fluidos pesados.

Cuando un cuerpo sólido se sumerge totalmente ó en parte, en un líquido ó en un gas, la porcion sumergida de superficie, puede considerarse como una pared que termina el fluido, y que por consiguiente sufre las mismas presiones que anteriormente sufrian las moléculas líquidas cuyo lugar ocupa. Estas presiones reunidas, mantenian en equilibrio la masa fluida, reemplazada por el cuerpo sumergido; luego tenian entonces y deben tener aun una resultante igual al peso de esta masa, que pasase por su centro de gravedad y dirigida de abajo arriba. El peso del cuerpo sumergido es tambien una fuerza igual al peso de este cuerpo, aplicada á su centro de

gravedad y dirigida de arriba abajo: es necesario pues, para que haya equilibrio, que estas dos fuerzas sean iguales y opuestas en direccion. De aqui se deducen generalmente todas las leyes del equilibrio de los cuerpos sólidos, sumergidos en cualesquiera fluidos, ó flotantes en su superficie; pero aqui nos limitaremos á considerar los que tienen una densidad uniforme, es decir, los líquidos incompresibles, y por estension las masas gaseosas contenidas en vasos pequeños.

Si el cuerpo sólido se halla sumergido enteramente y suponemos que es homogéneo, su centro de gravedad, coincide necesariamente con el de la masa fluida, cuyo lugar ocupa. La condicion de la oposicion de fuerzas se verifica, y no falta mas que su igualdad para que haya equilibrio. Si el cuerpo es igualmente tan pesado como el fluido, se mantendrá en equilibrio en cualquiera parte de él; si es mas pesado caerá al fondo, á causa del esceso de su peso, y si es mas ligero subirá á la superficie superior, saliendo en parte del líquido, si dicha superficie se halla libre: mas en todos casos, perderá una porcion de su peso, igual al del volúmen fluido que reemplaza.

Si el cuerpo no es homogéneo, su centro de gravedad no coincidirá siempre con el de la masa fluida; en este caso la circunstancia de la oposicion de fuerzas exigirá que el cuerpo se sumerja de modo que los dos centros de gravedad se hallen en una misma vertical, pues en cualquiera otra posicion el cuerpo caerá necesariamente, no estando sostenido su centro de gravedad.

Si el cuerpo sólido no está sumergido sino en parte, como que siempre está sostenido por el peso de la cantidad de fluido que desaloja, lo estará menos que estando enteramente sumergido. Para que se tenga en equilibrio será preciso que este peso sea igual al suyo, y que el centro de gravedad de la masa fluida desalojada, esté situado en la misma vertical que el del cuerpo entero. Tal es el caso de los cuer-

pos que flotan libremente sobre un líquido; cuando se les arroja en él, se colocan naturalmente de modo que se verifiquen estas condiciones; pero por algun tiempo oscilan hasta que llegan á este estado y consiguen fijarse.

La pérdida de peso que sufren los cuerpos sólidos en los líquidos en que se sumergen, puede comprobarse fácilmente, comparando los esfuerzos que es necesario hacer para sostener un mismo cuerpo cuando está sumergido en el agua, y cuando se halla fuera de ella, pues aun que el cuerpo pierde tambien en el aire una parte de su peso, igual al del volúmen de este fluido que desaloja, apenas es sensible, á causa de la poca densidad del aire. La esperiencia puede hacerse sin embargo con mayor exactitud, midiendo el peso efectivo del cuerpo en ambos casos, como esplicaremos en lo sucesivo, en cuyo supuesto se puede tambien apreciar la pérdida de peso en el aire.

CAPITULO IX.

Nociones generales sobre las diversas especies de movimiento, y sobre el tiempo, la velocidad y la masa.

Hemos llamado *movimiento* á la translacion de un punto material, de un lugar á otro del espacio. Concibamos ahora dos de estos puntos M M', fig. 36, que inmóviles al principio, parten despues para moverse en direcciones exactamente paralelas y perpendiculares á la línea recta que unia sus posiciones primitivas; podrá suceder que partan á la vez, ó bien sucesivamente. En este caso, uno de los dos puntos, por ejemplo, M, partirá antes que el otro, y este partirá *despues* que el primero, y estos fenómenos de *antes* y *despues* determinan en nosotros la idea del *tiempo* que resulta de la comparacion del estado sucesivo, con el estado de coexistencia. El conocimiento de estos dos estados, nos le da

la memoria, representando á nuestro espíritu, el órden y la sucesion de las impresiones que hemos esperimentado, tanto físicas como morales, mucho tiempo despues que han dejado de existir las circunstancias que las causaron.

Volvamos ahora á considerar nuestros dos puntos materiales, y supongamos que parten simultáneamente; en este caso podrán suceder dos cosas; ó estos dos puntos coexistirán siempre á iguales distancias del punto de que partieron como en la fig. 37, ó llegarán al mismo tiempo á diferentes distancias, precediendo el uno al otro, fig. 38. En el primer caso, sus movimientos serán iguales; en el segundo serán desiguales, siendo mas rápido el del que preceda al otro, y mas lento, el del que se quede atras. Hay, pues, bajo este aspecto diferentes grados que pueden compararse, y en esto consiste la *velocidad*.

Para hacer esta comparacion con exactitud, concibamos un movimiento de tal naturaleza que podamos reproducirle idénticamente á nuestro arbitrio, y que de él resulte una serie de fenómenos, que tenga un principio y un fin bien determinado, entonces se podrán comparar entre sí las velocidades, por los espacios recorridos mientras se verifica esta serie de fenómenos. Por ejemplo, podria obtenerse una serie semejante con mucha exactitud, por medio de un vaso cónico ABCD, fig. 39, que se llenase de agua ó mercurio, por su estremo superior A, y que se dejase vaciar en seguida por un agujerito C, hecho en su fondo, porque la evacuacion total de esta agua ó mercurio, seria un fenómeno que se reproduciria idénticamente, siempre que se repitiese la esperiencia, y ocuparia una porcion fija de tiempo. Muchos vasos iguales que se vaciasen sucesivamente, reproducirian otros tantos periodos iguales entre sí, y su sucesion mas ó menos numerosa, compondria intervalos de tiempo de una duracion mayor ó menor. Este periodo fundamental, podria subdividirse igualmente en intervalos de una duracion menor,

por medio de otros vasos semejantes pero mas pequeños, y cuando se hubieran llegado á fijar de este modo los menores intervalos que pudieran observarse, es evidente que se podrian designar todos los intervalos de tiempo imaginables, por medio de estas unidades y sus subdivisiones, y se tendria de este modo una medida exacta del tiempo que podria usarse para comparar las velocidades.

Este medio cronométrico ha sido el único que se ha usado en mucho tiempo. Para evitar la multiplicacion de estos vasos cónicos, se tenian dos, cerrados por todas partes, colocados uno sobre otro, y comunicándose por un agujerito comun muy pequeño, fig. 40. Se llenaba uno de estos conos de agua ó arena, y cuando se habia vaciado en el otro, se volvia rápidamente á este, en un intervalo de tiempo que se miraba como insensible; se le dejaba pasar de nuevo, se volvia, y asi sucesivamente. Estos instrumentos se llaman *clepsydras*. En el dia medimos el tiempo por medio de instrumentos incomparablemente mas exactos, y cuyos resultados se notan por sí mismos sin exigir la presencia continua de un observador, á saber, los relojes, tanto de faltriquera, como de péndola. Mas adelante daremos una idea de su mecanismo; por ahora nos bastará decir, que consisten como las clepsydras, en la repeticion de un movimiento periódico siempre el mismo, de suerte que es igual el modo con que miden el tiempo. La menor fraccion de tiempo empleada en el uso ordinario se llama segundo; la sucesion de 60 segundos componen un minuto; 60 minutos hacen una *hora*, y 24 horas, ó 86400 minutos, componen el intervalo de tiempo que hay entre dos llegadas sucesivas del sol al meridiano. Como el movimiento diurno del sol es desigual en las diferentes épocas del año, el intervalo de su vuelta al meridiano varía, y el *segundo* que nace de una subdivision fija de esta vuelta varía tambien; pero esta variacion puede despreciarse en los usos ordinarios de la vida, por-

que es muy pequeña, y oscila ya en mas, ya en menos, entre límites de muy corta estension. Los astrónomos la corrigen porque necesitan en sus operaciones de una exactitud infinitamente mayor, y arreglan sus segundos, minutos y horas por la marcha constante de un sol imaginario, cuyo movimiento es un medio proporcional entre la marcha mas lenta y la mas rápida del sol verdadero.

La medida del tiempo nos presenta el medio de comparar, no solo la velocidad de los diferentes movimientos, sino tambien su naturaleza, determinada por el modo con que se ejecutan. El mas sencillo de todos los movimientos es el que se llama uniforme, porque en él se halla siempre el móvil en el mismo estado que al momento de partir; tal es, por ejemplo, el que resultaria en el vacío de la impulsion súbita producida por una fuerza instantánea. El móvil que hubiera recibido esta impulsion, no pudiendo obedecer á ella sino en virtud de su inercia conservaria en todos los instantes el mismo movimiento que hubiese recibido en el principio. Recorreria, pues, en tiempos iguales, espacios iguales, cualquiera que fuese el tiempo que hubiese transcurrido desde el principio de su movimiento, y por consiguiente los espacios recorridos desde esta época serian proporcionales á los tiempos empleados en recorrerlos. Este es el carácter esperimental con que se reconocen los movimientos uniformes. La velocidad de estos movimientos se valúa por el espacio que hacen recorrer al móvil en un tiempo dado, por ejemplo, un segundo caracterizando cada velocidad por el número de metros recorridos.

Pero hay otros movimientos, en los cuales el móvil es solicitado sin cesar, por la impresion de la fuerza motriz que continúa obrando sobre él, despues de su partida. Entonces el modo ó la rapidez de la translacion *varia* sin cesar, por lo cual se da á este género de movimiento el nombre de *variado*; puede serlo de dos maneras, *acelerado* ó *retardado*, se-

gun que la accion continua de la fuerza ó fuerzas que obran sobre él contribuya á acelerarle ó á retardarle. Tenemos un ejemplo vulgar del movimiento acelerado en el descenso de los cuerpos pesados que caen libremente de arriba abajo, y del movimiento retardado en la ascension de los mismos cuerpos cuando son arrojados de abajo arriba por una impulsion primitiva.

Cuando un cuerpo esperimenta así un movimiento variado, producido por la accion contínua de una fuerza *acelerada*, si esta fuerza cesase de repente de obrar sobre él, es evidente que continuaria moviéndose únicamente en virtud de las impresiones que hubiese recibido anteriormente, y del mismo modo que si se hallase actualmente impelido por la suma de todas estas impulsiones, su movimiento, pues, se haria uniforme. La velocidad de este movimiento virtual espresa precisamente el estado en que se halla el móvil en la época en que se dispone á uniformarse, y por lo mismo su evaluacion es muy á propósito para fijar todas las fases que puede tener la aceleracion ó retardacion. Este resultado se obtiene por medio del cálculo conociendo la ley del movimiento de que se trata, es decir, la relacion general de los tiempos con los espacios recorridos con relacion á una época cualquiera, y se usa para comparar entre sí las diferentes fases de un movimiento en diversas épocas, ó las fases semejantes de diversos movimientos. Esto es lo que se llama su *velocidad*; y es evidente que esta denominacion asi generalizada puede tambien aplicarse al movimiento uniforme. Toda la diferencia de este á los otros movimientos, es que la velocidad es constante en él, y en los demas variable en diferentes épocas; pero la constancia es un caso particular de la variabilidad, á saber, aquel en que la estension de la variacion es nula.

El ejemplo mas sencillo de la accion de las fuerzas acceleratrices se presenta en la caida libre de los

cuerpos. Aunque en rigor la gravedad disminuye á medida que los cuerpos se separan de la superficie de la tierra, sin embargo, en la mayor parte de las esperiencias puede despreciarse esta variacion, que solo puede notarse con instrumentos de una delicadeza estraordinaria en las pequeñas alturas á que podemos elevarnos sobre la tierra; por lo demas se observa que los cuerpos caen siempre con la misma velocidad; ya partan de un parage mas elevado, ó ya de uno mas bajo. La gravedad, pues, obra constantemente sobre cada cuerpo durante su caida, y en cada instante de ella, con una energía sensiblemente igual, que aumenta las primeras impresiones que habia causado. Fijo ya este modo de accion, el cálculo determina la especie particular del movimiento que resulta de él, suponiendo al móvil en reposo en el momento de partir, y abandonado libremente á sí mismo. La solucion de este problema hace conocer las leyes siguientes:

El espacio total, recorrido por el cuerpo que cae es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido desde el momento que empezó á caer. Es decir, que si el espacio recorrido al fin del primer segundo se designa en general por 1, será 4 despues del segundo segundo, 9 despues del tercero, y asi sucesivamente, multiplicando siempre el número de segundos por sí mismo. Este espacio 1 es en la latitud de París $4^m,9044$ metros.

Si se concibe suspensa la accion de la gravedad, en cualquiera época de la caida, el cuerpo continuará cayendo con un movimiento uniforme; y su velocidad se hará constante, y tal, que en un tiempo igual al que ha transcurrido desde el pricipio de la caida recorrerá un espacio doble al que lleva recorrido. Esta ley es una consecuencia de la anterior. En efecto, cuando el móvil ha caido durante dos segundos, el espacio total que ha descrito se compone: 1.° de $4^m,9044$, recorridos en el primer segundo, en virtud de la accion sola de gravedad: 2.° de

un espacio igual descrito, en virtud de la misma accion, renovada durante el segundo siguiente; y 3.º del efecto desconocido que ha debido producir en este segundo la velocidad adquirida al fin del primero. Será, pues, necesario que este efecto sea el duplo de $4^m,9044$, ó $9^m,8088$, puesto que el espacio total descrito al fin del segundo segundo debe ser cuadruplo de $4^m,9044$. Del mismo modo, despues de dos segundos de caida habiendo recorrido el cuerpo $19^m,6176$, será capaz de recorrer el duplo de este espacio en otros dos segundos, por solo el esfuerzo de la velocidad adquirida, y por consiguiente en un segundo este mismo espacio, es decir, el duplo de $9^m,8088$. Calculando asi la serie de las velocidades adquiridas despues de 1, 2, 3, 4 segundos, y reduciendo sus efectos á lo que serian en un segundo, se halla que estan espresados por 2, 4, 6, 8, representando siempre uno el espacio fundamental descrito durante el primer segundo de la caida. *Luego estas velocidades aumentan proporcionalmente al tiempo.*

Hemos supuesto el móvil en reposo en el instante de partir; pero pudiera suceder que fuese arrojado en este instante por una impulsion primitiva. Supongamos esta impulsion vertical: si obrase sola y en el vacío daria al móvil un movimiento uniforme y una velocidad constante. Combinada con la gravedad, su potencia es siempre la misma, pero el efecto total es diferente. La velocidad variable producida por la gravedad se une á la de la impulsion primitiva, y la modifica, aumentándola si esta impulsion se dirije de arriba abajo, y disminuyéndola si se dirije de abajo arriba. En este último caso la velocidad creciente nacida de la gravedad destruye poco á poco la velocidad limitada que habia producido la impulsion; y cuando ha llegado á aniquilarla totalmente arrastra el móvil en la direccion que le es propia. Esto es, en efecto, lo que se observa en los cuerpos pesados, arrojados verticalmente de

de abajo arriba; suben con un movimiento retardado hasta cierta altura, en que permanecen un momento estacionados, y en seguida vuelven á caer libremente. Segun el modo de combatirse en este caso la velocidad constante con la variable, resulta, que *para arrojar un cuerpo á una altura dada, en el vacío, es preciso darle una velocidad de impulsion, exactamente igual á la que adquiriria cayendo libremente de esta altura.*

Galileo, que fue el primero que descubrió las leyes precedentes acerca del movimiento de los graves, las confirmó por la esperiencia, haciendo caer varios cuerpos desde una gran altura, y observando las diferentes circunstancias de sus movimientos. Pero esta especie de esperiencia está sujeta á algunas incorrecciones, á causa de la resistencia que opone el aire al movimiento de los cuerpos; resistencia que proviene: 1.º de la inercia de sus partículas, que les hace tomar una parte de la fuerza del cuerpo que choca con ellas: 2.º de su reaccion elástica, que hace que resistan á la compresion que debe resultar de este choque. Galileo tuvo cuidado de disminuir la influencia de estas causas, elijiendo cuerpos que tuviesen mucha masa en poco volúmen, como bolas de plomo y otros metales; pues dependiendo la resistencia del aire de la estension de la superficie que recibe el choque y la suma de fuerzas motrices de la cantidad de materia, esta disposicion era evidentemente la mas favorable para hacer menor la diminucion de velocidad nacida de la resistencia del aire. En el dia podemos suprimir este obstáculo haciendo caer los cuerpos en tubos vacíos de aire; en cuyo caso se observa que los mas raros y los mas densos, por ejemplo, la pluma y el plomo caen con igual velocidad; pero de este modo solo puede observarse la perfecta igualdad del tiempo de su caida, porque los tubos que se emplean son siempre demasiado cortos para poder reconocer, y mucho menos medir la aceleracion del movimiento. Pero se

consigue este objeto por medio de un ingenioso aparato inventado por Atwood.

Para comprender bien su teoría es preciso saber que la resistencia de los fluidos aeriformes crece con mayor rapidez que la velocidad de los cuerpos que se mueven en ellos; y es casi exactamente cuadrupla respecto á una velocidad doble, nueve veces mayor respecto de una triple, y asi sucesivamente siguiendo la ley de los cuadrados. De donde se sigue, que si se pudiera observar la caida de los cuerpos con una gravedad mucho menor que la verdadera, la resistencia del aire podria llegar á ser tan pequeña, que se pudiera despreciar sin alterarse en nada las leyes de la aceleracion, sino en ser menos rápida; con lo que se podria observar y aun medir en caidas de alturas muy pequeñas. Todas estas ventajas presenta el aparato de Atwood. Para reducirle á su mayor sencillez concibamos una polea fija, sobre la cual pase una seda muy fina, tirada á sus dos estremos por dos pesos perfectamente iguales entre sí y bastante grandes, como por ejemplo, de un cuarto ó medio kilógramo. Supondremos que la seda no tiene ningun peso sensible, y que su movimiento sobre la polea, asi como la rotacion de esta sobre su eje son perfectamente libres y exentos de todo roce; esto supuesto, es claro que los dos cuerpos se equilibrarán perfectamente, cualquiera que sea su posicion, pues la fuerza de la gravedad sobre ambos es exactamente la misma. Ademas, por causa de la perfecta libertad de la seda y de la polea, la menor impulsion, dada verticalmente á uno ú otro de estos pesos, bastará para ponerlos en movimiento; y pues toda la accion de la gravedad está compensada por su reaccion mútua, este movimiento será uniforme, es decir, que cada uno de los pesos recorrerá iguales distancias en tiempos iguales. Este primer resultado es muy fácil de comprobar, colocando un relox junto á este instrumento, y midiendo con exactitud el tiempo que pasa mientras cada peso llega á

marcas fijas señaladas en una escala vertical á diferentes alturas, como espresa la fig. 42.

Ahora, supongamos que se añade á una de estas masas iguales un pequeño círculo metálico equivalente á una fraccion muy pequeña de su peso, por ejemplo, á $\frac{1}{500}$. Si este cuerpo estuviese abandonado á sí mismo, caeria naturalmente hácia la tierra, en virtud de su gravedad, y con la aceleracion ordinaria producida por esta fuerza; pero estando colocado en el instrumento y unido á una y otra masa, no puede bajar sin que su movimiento se comunique á ellas; luego es preciso que dividida con ellas la fuerza que la imprime la gravedad; y debe resultar el mismo efecto que si esta fuerza estuviese uniformemente repartida entre todas las partículas de materia que componen el sistema total de las tres masas; lo que disminuye en la misma proporcion la energía de su accion individual. Por ejemplo, si las dos masas grandes pesan juntas 499 gramos y la pequeña pesa 1, la fuerza ordinaria de la gravedad se distribuirá igualmente sobre los 500 gramos que componen el sistema; y asi todos los efectos de la aceleracion se reducirán á la misma proporcion, es decir, serán $\frac{1}{500}$ de su valor natural. Se les podrá pues, observar en el aire del mismo modo que en el vacío, en razon de la poca resistencia que deben encontrar, y una altura de dos metros bastará para hacer conocer todas las particularidades del movimiento. Si se emplean sucesivamente varias masas adicionales, cuyos pesos sean diversos, se observará si los valores absolutos de estos resultados crecen en la misma razon que indica la reparticion de las fuerzas; y en efecto, esta proporcion se verifica, y con tanta mas exactitud, cuanto mas se disminuyen las causas accidentales que se oponen á la simplicidad y á la regularidad de los movimientos.

Será igualmente fácil comprobar la intension de la velocidad adquirida en diferentes épocas de la caida. Para esto no hay mas que dar á la masa adicional

la forma de una lámina cuadrilátera, fig. 41, que puesta sobre las grandes masas sobresalga un poco por todas partes, y disponiendo tambien un anillo movible AA, que pueda correr á lo largo del instrumento, se colocará este anillo á la distancia que se quiera del punto en que empieza el movimiento. Cuando la masa adicional llegue á encontrar á este anillo será detenida y quedará colocada sobre él, no quedando en movimiento sino las dos masas grandes, que equilibrándose mútuamente, y siendo por consiguiente como insensibles á la accion de la gravedad, solo continuarán moviéndose en virtud de la velocidad que hayan adquirido. Se podrá, pues, conocer por este medio si la velocidad sigue efectivamente respecto á las diversas alturas las proporciones que hemos indicado. La esperiencia las confirma en efecto exactamente.

Para mayor sencillez hemos supuesto que la seda no tenia ningun peso y que la polea no sufria roce alguno. Como estas condiciones son ideales se procura aproximarse á ellas todo lo posible, empleando una seda sumamente fina y flexible, y suspendiendo el eje de la polea sobre otras poleas muy movibles, como representa la fig. 42, en que está dibujado completamente el instrumento. A pesar de todas estas precauciones siempre quedan algunos indicios de los movimientos que se trataba de evitar, pero tan debilitados, que su efecto puede mirarse como insensible, pues no ofrece obstáculo ninguno á la observacion de las leyes de los movimientos que se quieran comprobar.

Al estudiar las condiciones del equilibrio hemos observado, que cuando un cuerpo sólido está puesto sobre un plano inclinado, el esfuerzo que la gravedad ejerce sobre él está en parte destruido por la resistencia del plano; de suerte, que en virtud de esta resistencia se encuentra impulsado en la direccion del plano por una fuerza menor que la gravedad efectiva. Esto nos ofrece un nuevo medio de

disminuir la energía de la gravedad, y hacerla bastante débil para poderse observar en pequeñas alturas las leyes de la aceleracion que resultan de ella. Este medio fue empleado con éxito por Galileo, tomando todas las precauciones imaginables para disminuir los efectos del roce, que son mucho mas sensibles que en la máquina de Atwood. De este modo se obtienen los resultados siguientes, que son de un grande interés, en cuanto sirven para descubrir las relaciones que existen entre las diversas intensidades de las fuerzas y las velocidades que producen.

Cuando un cuerpo pesado ha llegado por medio de una caida oblícua al estremo inferior de un plano inclinado tiene exactamente la misma velocidad que hubiera adquirido cayendo verticalmente la altura de este plano; de donde se sigue, que si muchos móviles parten juntos de un mismo punto A, fig. 43, y recorren otros tantos planos diversamente inclinados, pero de igual altura, como AB, AB′, AB″, habrán adquirido iguales velocidades al fin de su caida. Ademas, en un círculo ABD, fig 44, todas las cuerdas AB, AB′, AB″, AD, que salen de un mismo punto A y terminan en la circunferencia del círculo se recorren en tiempos iguales.

Estos resultados, analizados por el cálculo, prueban, que sobre el plano inclinado los efectos de la aceleracion se debilitan en la misma proporcion que la gravedad que los produce; de suerte, que si la gravedad está reducida á la mitad de su energía, da en igual tiempo una velocidad como la mitad, y asi en los demas casos; lo cual no podria descubrirse sino por la esperiencia. En efecto, cuando reunimos muchas fuerzas ó dividimos una, reduciéndola á la mitad, al tercio ó al cuarto de su energía, nada prueba, *à priori*, que la velocidad que resultará será mayor ó menor en la misma proporcion, pues podria variar como el cuadrado de la fuerza, ó en cualquiera otra progresion; pero los hechos que acabamos de citar prueban que en el órden natural la

velocidad es proporcional á la fuerza. Esta es una ley importantísima, que la mecánica necesita tomar de la esperiencia; pero este principio y el de la inercia son las únicas verdades condicionales en que se apoya esta ciencia.

Debemos tambien observar en la máquina de Atwood la reparticion del esfuerzo del peso adicional entre todas las partes movibles del aparato, reparticion que es una consecuencia de la inercia. En general, esta propiedad hace que la misma fuerza produzca velocidades desiguales, segun las cantidades de materia á que se aplica. Si una fuerza imprime á una partícula material cierto movimiento, para dar este mismo movimiento á dos ó tres partículas semejantes, será preciso doblar ó triplicar la fuerza, y en general multiplicarla por su número; si en seguida se reunen todas estas partículas en un mismo grupo, formarán un cuerpo sensible, cuyo movimiento será el mismo que el de cada una de las partículas, siendo una fuerza mayor la que se emplee en producirle. Se ve, pues, que para determinar la relacion del movimiento con la fuerza motriz, es preciso tener en consideracion la cantidad de materia movida. Esta cantidad es lo que se llama *masa* de los cuerpos, y se hace conocer por el resultado mismo que acabamos de decir, pues si tratamos de mover diversos cuerpos de igual naturaleza, pero de diferente volúmen, colocados sobre un mismo plano horizontal, que sea lo mas terso posible, conocemos al momento que es preciso emplear distintos esfuerzos para comunicarles igual movimiento.

Conforme á este principio, para conocer la igualdad de masas entre cuerpos semejantes, suponiéndolos de igual naturaleza, será preciso aplicar á todas sus partículas fuerzas ó velocidades iguales, para ver si se equilibran mutuamente. Esto se conseguirá suspendiendo, por ejemplo, los dos cuerpos á los dos estremos de una palanca inflexible, cuyos brazos fuesen idénticamente iguales. En este caso la gravedad

seria la fuerza constante, que obrando igualmente sobre cada una de sus particulas conspiraria á comunicarlas iguales velocidades. Esto es lo que se hace por medio de los instrumentos llamados *balanzas*, de que se hace uso para pesar un cuerpo con otros de igual naturaleza que él.

Pero suponiendo establecido de este modo el equilibrio entre cuerpos de distinta naturaleza: ¿podremos deducir de él la igualdad de sus masas? Para esto seria preciso saber, si la misma fuerza aplicada á cantidades de materia iguales, pero de diferente naturaleza, les comunicaria movimientos iguales. Esto no podemos afirmarlo á *priori*; pero esta cuestion nos es absolutamente indiferente en todas las esperiencias que podemos hacer, pues nos basta emplear, sino como iguales, á lo menos como equivalentes, las masas que animadas de iguales velocidades, se equilibran cuando sus movimientos son opuestos. Entonces esta equivalencia podrá medirse en todos los cuerpos, por la igualdad de los pesos, pues la gravedad imprime á todos los cuerpos iguales velocidades en el vacío; y en general los pesos serán proporcionales á las masas, de suerte que podrán servir para compararlas. Esto es lo mismo que prescindir en la mecánica de la diversidad de naturaleza de los cuerpos, y á no considerar en ellos, sino diferentes cantidades de materia inerte, igualmente susceptibles de ser puestas en movimiento. Esta observacion esplica y confirma la regla dada en la pág. 29 y 30, capítulo 4.° para valuar las densidades de los cuerpos, por el resultado de sus pesos en volúmenes iguales.

Habiendo demostrado por las esperiencias anteriores que las fuerzas son proporcionales á las velocidades, podemos en general medir unas por otras, componer las velocidades como hemos compuesto las fuerzas, y medir los diferentes grados de energía, tanto de las impulsiones como de las fuerzas aceleratrices constantes, por las velocidades que imprimen

en un tiempo dado á masas iguales ó equivalentes, abandonadas libremente á su accion.

Se puede tambien prescindir de esta igualdad, como hemos hecho en la máquina de Atwood, teniendo en consideracion la relacion de las masas sobre que se hacen obrar las fuerzas. En efecto, tomemos por unidad la masa de un cuerpo determinado, por ejemplo, la de un gramo de agua destilada; si se han observado y medido en metros, las velocidades comunicadas por ciertas fuerzas á otras masas diferentes de aquella, no habrá mas que multiplicar estas velocidades, por el número de gramos que contienen dichas masas, y el producto espresará en metros las velocidades que la misma fuerza, ó suma de fuerzas hubiera comunicado á un solo gramo. En general el producto de la masa movida por la velocidad que se le ha comunicado, se llama *cantidad de movimiento*, y segun lo que acabamos de decir, se ve claramente que este producto es la verdadera medida de las fuerzas motrices.

Las fuerzas aceleratrices constantes son las que pueden observarse con mas frecuencia en la naturaleza; pero tambien pueden concebirse fuerzas, cuyas impresiones sucesivas tuviesen intensidades variables en diversas épocas. Para tener una medida de su intensidad, se considera que cualquiera que sea su variacion, si cesase de repente, las transformaria en fuerzas aceleratrices constantes, cuya intensidad seria variable en las diferentes épocas del movimiento. Ahora bien, conociendo la relacion general de los espacios con los tiempos, se puede deducir por medio del cálculo este valor ideal de la fuerza aceleratriz constante que se estableceria en cada época; y este resultado sirve, ya para esplicar las fuerzas aceleratrices, ya para compararlas entre sí, como se comparan los movimientos variados, conforme á la velocidad uniforme que se estableceria, si cesase de repente la variacion que produce la accion continuada de la fuerza.

CAPÍTULO X.

Del movimiento curvilineo; fuerzas centrales; fuerza centrifuga.

Cuando un punto material libre, ha recibido la impulsion de una fuerza instantánea, hemos visto que en virtud de su inercia, debe moverse invariablemente en la direccion recta en que esta fuerza le ha arrojado. Concibamos ahora, que despues de haber recorrido asi cierto espacio, sufra una nueva impulsion en otra direccion distinta, es claro que su movimiento cambiaria de direccion y de velocidad, pero ¿en que consistirá este cambio, y cuál será el nuevo movimiento? He aqui la primera cuestion que tenemos que resolver para considerar los movimientos curvilíneos.

Su resolucion es fácil, siguiendo el principio de que las fuerzas son proporcionales á las velocidades. En efecto, sea F M, fig. 45, la direccion del primer impulso, y F′ M el del segundo, recibido por el punto material en M; prolonguemos estas direcciones y tomemos en cada una de ellas, una parte igual al espacio que describiria el punto material en la unidad de tiempo, si únicamente estuviese impelido por cada una de las dos fuerzas; hecho esto, compongamos estas velocidades, como compondriamos dos fuerzas acabando el paralelógramo M F F′ R, y la diagonal M R de este paralelógramo, espresará el tamaño y direccion de la velocidad resultante, de suerte que el punto material se hallará en R, al fin de la unidad de tiempo.

El resultado de esta construccion es absolutamente el mismo que si el cuerpo continuára moviéndose con la primera fuerza por un canal rectilineo M F, que se transportase de M F, á F′ R en la misma unidad de tiempo: asi que, en el movimiento compuesto, cada movimiento parcial, se ejecuta como si estuviese solo. Esta manera de composicion, se comprueba

por una multitud de esperiencias diarias. Colóquese un relox en un barco abandonado á la corriente tranquila de un rio, y continuará andando exactamente como si estuviese en tierra, sin que los movimientos complicados de sus diferentes piezas se alteren nada por este movimiento comun. Este mismo principio hace que no percibamos el movimiento de la tierra, que sin embargo nos impele por el espacio con una gran rapidez, á causa del modo igual con que este movimiento comun se uniforma con todos los que nosotros podemos hacer.

Del mismo modo que acabamos de hallar, el movimiento que resulta de dos impulsiones sucesivas, podemos calcular el que resulta de un número cualquiera de impulsiones dadas al cuerpo en épocas y direcciones diferentes. Ahora bien, siempre que estas nuevas impulsiones no coincidan en una misma direccion, el punto material que la sufre, se desviará sucesivamente de su direccion; de modo que formará un polígono rectilíneo. Aproximemos las épocas de estas impulsiones sucesivas, y representarán el efecto continuo de una ó muchas fuerzas aceleratrices, y el polígono se transformará en una curva, que será la *trayectoria curvilinea*, del móvil sometido al efecto de estas fuerzas.

El ejemplo mas sencillo de un movimiento semejante es el de un cuerpo pesado, solicitado á un mismo tiempo por la gravedad, y por una impulsion primitiva, oblicua á la vertical. Su resultante se puede hallar del mismo modo que antes. Por el punto M, fig. 46, en que supondremos hallarse el cuerpo en el momento de partir, tiremos una línea vertical A Z, sobre la cual tomaremos la parte M S, igual á la que describen los cuerpos pesados, en el primer segundo de su libre caida: marquemos despues sobre la misma vertical los puntos 4, 9, 16, 25, á que llegaria el mismo cuerpo, al fin del 2.° 3.° 4.° y 5.° segundo, y asi sucesivamente. Del mismo modo sobre la línea M F, direccion de la impulsion primitiva, tomemos

las distancias A 1′, 1′ 2′ &c., todas iguales entre sí y al espacio que esta impulsion haria recorrer al móvil en la unidad de tiempo, los puntos 1′, 2′, 3′, señalarán el sitio en que el móvil se hallaria al fin de cada segudo, si obrase solo sobre la impulsion primitiva. Ahora para tener el efecto simultáneo de las dos fuerzas, acabaremos, respecto á cada época el paralelógramo de las velocidades, y tendremos otros tantos puntos M, M′, M″ donde se hallará sucesivamente el móvil en los segundos correspondientes. La continuidad de estos puntos forma una línea curva, que los geómetras llaman *parábola*. Las bombas y demas proyectiles arrojados por la fuerza espansiba de la pólvora, presentan un ejemplo de este movimiento, en el cual esta fuerza es la impulsion primitiva. El punto mas elevado de la parábola S, fig. 47, se llama altura del tiro, y la distancia M N, á la cual el proyectil viene á hallarse al nivel del punto de donde salió, se llama amplitud ó estension del tiro. Sin embargo, solo por una aproximacion muy imperfecta puede considerarse como parabólico el movimiento efectivo de los proyectiles, pues la resistencia del aire con que no hemos contado, la hace cambiar notablemente.

El ejemplo que acabamos de presentar, basta para hacer conocer que todo movimiento curvilíneo exige, á lo menos, la combinacion de dos fuerzas que obren simultáneamente en distintas direcciones; y que variando de un modo conveniente la direccion y modo de obrar de estas fuerzas, se puede hacer describir á un punto material toda clase de curvas, con la especie de velocidad que se quiera. Entre esta infinidad de movimientos diferentes, hay uno que merece una atencion particular, á saber, aquel en que una de las dos fuerzas está dirigida constantemente hácia un centro fijo, siendo la otra una simple impulsion instantánea. Este es el caso en que se hallan los cuerpos celestes; y nos ofrece ademas resultados aplicables á una infinidad de esperiencias.

Supongamos el cuerpo en M, fig. 48, en el momento de partir, y sea O el centro fijo, hácia el cual se dirije. En los cuerpos celestes, esta atraccion es recíproca al cuadrado de las distancias; es decir, que representando su energía por 1 á la distancia 1, solo será $\frac{1}{4}$ á la distancia 2, $\frac{1}{9}$ á la distancia 3, y asi sucesivamente; pero aqui para considerar la cosa en general, no fijaremos ley ninguna, suponiendo solo, que existe una fuerza central cualquiera, cuyo modo de obrar sea conocido. Esto supuesto, si el móvil M, que supondremos ser un simple punto material, fuese únicamente impelido por la accion de esta fuerza, es claro que se pondria directamente en movimiento hácia el centro C, siguiendo la recta M O, y llegaria á él con cierta aceleracion, dependiente de la intensidad de la fuerza á diferentes distancias de este centro. Pero si concebimos que en el momento de partir, haya recibido una impulsion instantánea en una direccion diferente de M O; por ejemplo M F, es claro que tomará un movimiento intermedio entre las direcciones de las dos fuerzas que obran sobre él, y podremos determinar su marcha por el principio de la composicion de las velocidades. Mas como la fuerza central por su naturaleza varía sin cesar de direccion á medida que el móvil gira al rededor del centro, y de intensidad á medida que se acerca ó se separa, vemos que será necesario repetir la composicion de las velocidades en intervalos de tiempo, sumamente inmediatos que llamaremos *instantes* y que serán tan cortos, que durante cada uno de ellos, pueda considerarse la fuerza central como sensiblemente constante. Supongamos, pues, que en el primer instante pudiese esta fuerza obrando sola, hacer pasar el móvil de M á C, y que la impulsion lateral, por sí fuese capaz de hacerle describir en el mismo instante, el espacio rectilíneo M F, obtendremos el camino que ha recorrido el móvil, construyendo el paralelógramo M C F M′ sobre las dos velocidades, y veremos que se hallaria en M′ al fin del primer ins-

tante. Si entonces cesara de repente la fuerza central, el móvil continuaria moviéndose en virtud de la velocidad compuesta que hubiese adquirido; y la direccion de este movimiento, seria la prolongacion del arquito M M′, que en razon de su pequeñez, puede considerarse como rectilíneo, y tangente á la verdadera trayectoria curvilínea. Por consiguiente, nada nos impide volver á empezar en M′ la composicion de las nuevas velocidades, tomando sobre la prolongacion de M M′, una parte M′ F′ igual á la que la velocidad adquirida al fin del primer instante haria recorrer al móvil en el segundo, y sobre la línea M′ O, la parte M′ C′ igual á la que le haria describir la fuerza central por sí sola, la cual podrá, y aun generalmente deberá ser diferente de M C á menos que no sean iguales las distancias M O, M′ O. Componiendo estas nuevas velocidades por medio del paralelógramo M′ C′ F′ M″, tendremos la direccion M′ M″ del móvil, durante el segundo instante, y repitiendo la misma construccion respecto á los demas, determinaremos todos los puntos á donde sucesivamente llegará el móvil. La continuidad de estos puntos formará un polígono, que estará tanto mas próximo á confundirse con la trayectoria curvilínea, cuanto mas inmediatas se hayan hecho las composiciones de las velocidades; y la diferencia desaparecerá totalmente, si la composicion se hace, no por medio de una construccion gráfica, siempre sensible y grosera, sino por medio del cálculo que penetra hasta los límites de los infinitamente pequeños.

Se ve por todo lo que hemos dicho, que la trayectoria formada de este modo, puede variar segun la accion de la fuerza central, y su relacion con la direccion y energía de la impulsion primitiva. En el movimiento de los cuerpos celestes la fuerza central es una atraccion recíproca que impele estos cuerpos unos hácia otros, con una intensidad proporcional á su masa, é inversa del cuadrado de su distancia. Calculando conforme á esta ley y no consideran-

do mas que el movimiento de dos cuerpos que se atraen mútuamente se encuentra que este movimiento no puede hacerse sino en una de las curvas que los geómetras llaman *secciones cónicas*, porque resultan de cortar un cono de base circular en diferentes direcciones. Estas curvas se dividen en cinco especies, que son: la elipse, el círculo, la parábola, la hipérbola y la línea recta. La elipse es la curva que describen los planetas. El círculo, que es una ligera modificacion de la elipse, parece que le describen algunos satélites al rededor del planeta á que pertenecen, y que es el centro de sus movimientos. La parábola es la órbita que describen la mayor parte de los cometas observados hasta ahora. En todos casos el cuerpo que sirve de centro está colocado en el punto que se llama *foco* de la seccion cónica. La hipérbola y la línea recta no parece que se han presentado hasta ahora en las observaciones; pero teniendo estos dos géneros de movimiento, la propiedad de alejar cada vez mas los cuerpos que los sufren, es posible que hayan pasado algunos por su perihelio, que es donde podemos verlos antes de la época reciente en que se ha empezado á observar sobre la tierra, en cuyo caso no deberemos admirarnos de no ver ninguno actualmente.

Hemos visto por la manera de componerse las velocidades que producen el movimiento curvilíneo, que el móvil en cada punto de su carrera procura seguir la línea recta, tangente en este punto á la curva que debe describir; y que en efecto continuaria siguiendo esta tangente si la accion de la fuerza central no le condujese de nuevo hácia el centro, en torno del cual se mueve. Asi, mientras el móvil hubiera pasado de M á F, fig. 48, en virtud de la velocidad adquirida, la fuerza central le atrae de F á M′, con una aceleracion, que á causa de la pequeñez de FM′ puede mirarse como constante; de suerte, que la tendencia del móvil á separarse del centro de movimiento puede espresarse y medirse por

FM′, respecto á cada instante. Esta tendencia se llama *fuerza centrífuga*; y se ve que en el movimiento curvilíneo libre, producido por una fuerza central, es cada instante igual á esta fuerza y directamente opuesta.

Cuando la trayectoria descrita de este modo es un círculo, fig. 49, y el movimiento de circulacion es uniforme, la línea FM, que mide la fuerza centrífuga en cada instante infinitamente pequeño, es proporcional al cuadrado del arco MM′, dividido por el duplo del radio OM′ del círculo. Asi, comparando su tamaño con el que otra fuerza constante, por ejemplo, la gravedad, haria describir al móvil en el mismo tiempo, su relacion espresará la de las dos fuerzas.

Este resultado se aplica, no solo á los movimientos circulares libres, sino que se verifica tambien en el caso en que la forma circular resultase de una condicion forzada, tal como la existencia de un canal sólido en que hubiera de moverse el cuerpo, ó la traccion de un hilo inestensible, que le retuviese siempre á igual distancia de su centro de movimiento. Entonces la fuerza centrífuga se produciria igualmente en cada punto de círculo descrito; y suponiendo uniforme el movimiento de circulacion tendria la medida que hemos indicado; solamente que seria destruida por la resistencia de las paredes sólidas del canal, ó por la que opondria el hilo á su separacion. Estas resistencias harian entonces las veces de fuerza central. Por esta razon se estienden las cuerdas de una honda cuando se la hace girar, y se conoce prácticamente que se estienden tanto mas, cuanto mas rápida es la circulacion. Si se abandona uno de los estremos el móvil queda en libertad, sale por la tangente al punto en que se halla, y va á describir una parábola, en virtud de la combinacion de este impulso con la gravedad; mas si las cuerdas se tienen sujetas constantemente, acelerando siempre el movimiento, la fuerza centrífuga puede llegar

á ser tan enérgica que las rompa por su tension, y entonces se escapa igualmente el móvil por la tangente al punto de su órbita, en que se encuentra en el momento de verificarse la rotura.

Una fuerza semejante á esta se produce tambien en la superficie y en cada punto del interior de un cuerpo sólido que se hace girar al rededor de un eje. Las moléculas materiales que componen este cuerpo son entonces otros tantos móviles que tienen su fuerza centrífuga particular, dependiente del tamaño del círculo que describen y de la velocidad de su circulacion; y como en virtud de la solidez que las une se ven precisadas á circular todas en igual tiempo, resulta, que sus velocidades son como sus distancias al centro de rotacion, esto es, como los radios de los círculos que describen. Luego si el movimiento circular es uniforme, sus fuerzas centrífugas serán proporcionales á estos mismos radios; y asi las moléculas harán mayor esfuerzo para separarse del eje: á medida que por su posicion se hallen mas distantes de él. Todos estos esfuerzos deben ser sostenidos y contrabalanceados por la coesion de las partículas para que el cuerpo no se divida; y si el movimiento de rotacion llega á ser tan rápido que se hace superior á ella, las partículas que componen este cuerpo se separarán, saldrán por la tangente y se diseminarán en el espacio.

Girando la tierra sobre sí misma en el intervalo de un dia sidereo, cuya duracion es de 86164 segundos medianos, todas sus partes deben esperimentar fuerzas centrífugas, resultantes de este movimiento, y los cuerpos que se desprendiesen de su masa deberian irse por la tangente si no se hallasen contenidos por ninguna otra fuerza; pero la energía preponderante de la gravedad los atrae sin cesar á la superficie, y aun los haria caer hasta el centro de la tierra, á pesar de la fuerza centrífuga, si no se opusiese la impenetrabilidad del resto de la masa. En el ecuador, por ejemplo, el radio de la tierra es de

6376466 metros, cuyo duplo 12752932 metros, multiplicado por $\frac{355}{113}$, relacion de la circunferencia al diámetro, da una circunferencia 40064521 metros; un cuerpo colocado en este círculo le describe en un dia compuesto de 86164 segundos, lo que da una velocidad de 465 metros por segundo. El cuadrado de este número es 216225, que dividido por 12752932, diámetro de la tierra, el cociente 0.01695 metros será el valor de la fuerza centrífuga en la superficie del ecuador, es decir, será la línea que esta fuerza hace describir allí á los cuerpos en un segundo de tiempo. Ahora bien, en este mismo tiempo el esceso de la gravedad sobre la fuerza centrifuga hace caer los cuerpos 4,89 metros; de donde se sigue, que en virtud de la gravedad sola caerian 4,89+0,01695, ó lo que es lo mismo, 4,90695 metros. Este número, dividido por 0,01695 da el cociente 289; luego en el ecuador la fuerza centrífuga es $\frac{1}{289}$ de la gravedad. Esta relacion se acercaria á la unidad si se acelerase el movimiento de rotacion de la tierra, y se aumentaria como el cuadrado de la velocidad; y como 289 es el cuadrado de 17, resulta, que si la velocidad de circulacion llegase á ser diez y siete veces mayor, la fuerza centrífuga en el ecuador igualaria á la gravedad, y los cuerpos colocados en esta parte de la tierra cesarian de pesar sobre su superficie. La fuerza centrífuga combate tambien á la gravedad en los demas puntos de la tierra, pero menos que en el ecuador: tanto porque estando los otros paralelos mas próximos al eje de rotacion es menor en ellos la fuerza centrífuga, como porque la direccion de esta fuerza es entonces oblícua á la vertical en que obra la gravedad. Suponiendo que los cuerpos celestes hayan sido primitivamente fluidos, como hacen suponer una infinidad de fenómenos, la atraccion mútua de sus partes les hubiera hecho tomar una forma absolutamente esférica si ninguna otra fuerza hubiera obrado sobre ellos. Pero estando todos dotados de un movimiento de rota-

cion al rededor de un eje; la fuerza centrífuga nacida de este movimiento ha debido hacer menos pesadas las partes situadas cerca del ecuador; lo cual ha debido producir en este parage una acumulacion mayor de materia, y asi se observa que todos los cuerpos celestes estan elevados por el ecuador y aplastados por sus polos de rotacion. En general en todo movimiento curvilíneo se produce siempre una fuerza centrífuga, pues en cada punto de la curva descrita, el móvil trata de salir por la tangente, y continúa siguiendo la curva porque esta fuerza centrífuga es destruida por otras; ya sea que la accion de estas se dirija hácia un centro fijo ó no. Entonces la intensidad de la fuerza centrífuga se hace en general variable, respecto á cada punto de la trayectoria; pero se la puede valuar por los mismos principios, considerando el movimiento como si se efectuase en cada instante sobre una circunferencia de círculo que tuviese tres elementos comunes con la trayectoria. Este círculo, que se llama *osculador*, deberá generalmente variar de radio, segun los puntos que se consideren; pero siempre se puede determinar por medio del cálculo la longitud de su radio. Del mismo modo se puede valuar la velocidad actual del móvil en los puntos de la trayectoria á que corresponde; y la fuerza centrífuga en estos puntos puede considerarse como comun á los movimientos que se verificarian en virtud de esta velocidad sobre el círculo ó sobre la curva; lo cual ofrece el medio de poderla valuar por el método esplicado antes.

CAPÍTULO XI.

Oscilaciones del péndulo.

Hay tambien otro caso de movimiento curvilíneo que nos conviene considerar por causa de sus aplicaciones prácticas, á saber, el de un cuerpo soli-

do y pesado, suspenso de un eje fijo, que por poco separado que se halle de la vertical, si se le abandona á sí mismo, va y viene de un lado á otro de esta línea, por un movimiento que se llama *de oscilacion.* Todo el mundo sabe que los relojes de péndola, por cuyo medio se mide con tanta exactitud el tiempo, se arreglan por la misma péndola que es una varita de metal, movida del modo que hemos dicho, y esto basta para indicar la utilidad que debe resultarnos de esta teoría. El caso mas sencillo de este movimiento, y por lo mismo el primero que debemos examinar, es el de considerar un simple punto material M, fig. 50, suspendido á la estremidad de un hilo O M, inestensible, inflexible, sin masa y unido por su estremidad superior O á un obstáculo fijo. Si suponemos el hilo vertical, y el punto en reposo, continuará invariablemente en este estado, á menos que no se le saque de él por una impresion lateral, porque la resistencia del hilo destruye todo el esfuerzo de la gravedad para hacerle caer. Pero supongamos que el hilo y por consiguiente el punto se separen de la vertical, abandonándolos en seguida á sí mismos, es evidente que la gravedad procurará hacerle volver á su primera posicion, porque siendo oblicua á su direccion la del hilo, no quedará completamente destruida por su resistencia. Para conocer mejor esto, supongamos que por la nueva posicion M′ del móvil, se tira una vertical M′ Z, sobre la cual se toma una parte arbitraria M′ G, para representar la intensidad absoluta de la gravedad. Tiremos despues por el estremo G, dos líneas G P, G F, una perpendicular, y otra paralela á la direccion actual del hilo; es claro que la fuerza M′ G podrá considerarse como una resultante, cuyas componentes fuesen M′P y M′ F, de suerte que se la pueden sustituir estas sin alterar en nada el estado de la cuestion. Ahora bien, hallándose la primera M′P, dirigida segun la prolongacion del hilo, queda destruida por su resistencia, y solo queda la fuerza M′ F, que siendola

perpedicular, no sufre ninguna diminucion por su parte. Asi el móvil procura caer en virtud de esta sola fuerza; y como nada se opone á que obre conforme á ella, es claro que se pondrá en movimiento segun su direccion, que es el de la tangente al círculo que puede describir. Repitiendo la misma construccion en diferentes puntos dei arco M′ M, y representando siempre la gravedad por partes iguales, se ve que la componente activa M′ F, disminuye á medida que el móvil se acerca al punto mas bajo del círculo, y llega á ser nula en este punto en que la resistencia del hilo destruye absolutamente el esfuerzo de la gravedad. Por consiguiente, el movimiento será acelerado, puesto que el móvil se encuentra impelido por una fuerza continuamente activa; pero no seguirá las leyes de la caida libre, porque la intensidad de esta fuerza varía y disminuye sin cesar desde el punto mas alto al mas bajo de su carrera.

Llegado á este punto, el móvil sostenido enteramente por el hilo, se hallará sustraido un instante á la accion de la gravedad; pero por razon de su inercia, continurá moviéndose en virtud de la velocidad que ha adquirido anteriormente, y como está precisado á describir un círculo, se elevará por el otro lado de la vertical. Entonces, no estando la gravedad destruida enteramente, obrará sobre él para obligarle á bajar, y crecerá la intensidad de su accion á medida que suba por el arco que describe; el móvil se hallará, pues, en el caso regular de un cuerpo pesado, arrojado de abajo arriba por una impulsion instantánea, con la diferencia de que la gravedad que obra sobre él no será constante, sino que su energía se aumentará sucesivamente. Llegará una época en que quede destruida la velocidad comunicada por la primera impulsion; lo cual se verificará evidentemente cuando el móvil, que suponemos en el vacío, se eleve por este lado de la vertical á la altura del punto S, de donde empezó á caer por el otro lado; y de este punto empezará á

caer de nuevo hácia la vertical, partiendo de un estado de reposo, como la primera vez. Subirá por el otro lado, bajará para volver á subir, y las *oscilaciones* continuarán de este modo indefinidamente por el arco SMS′, mientras algun obstáculo, roce ó resistencia no las haga detener. Estas idas y venidas, determinadas siempre por las mismas causas, es evidente que durarán un mismo tiempo, es decir, que las oscilaciones sucesivas serán *isócronas* entre sí.

La simplicidad de este caso ideal, se altera en la práctica por diversas causas inevitables. Desde luego no puede verificarse la suposicion de un simple punto material suspendido de un hilo sin masa, pues es preciso emplear cuerpos sólidos, de dimensiones y peso sensibles; pero esto se suple por medio del cálculo, conociendo la forma de estos cuerpos, y la densidad de todas sus partes. Los geómetras saben el método para deducir de estos datos la longitud del péndulo simple ideal, que haria sus oscilaciones en el mismo tiempo que el cuerpo sólido de que se ha hecho uso.

Un aparato de esta clase, se llama un *péndulo compuesto*, y se le pueden dar diferentes formas y tamaños, segun el uso á que haya de aplicarse. El que sirve ordinariamente para los relojes, consiste en una varita, ó en una coleccion de varitas metálicas, C A, fig, 51, bajo de las cuales se fija una lenteja tambien metálica, muy adelgazada por sus bordes, y muy pesada para que pueda separar mejor el aire, y encontrar menos resistencia. La parte superior está atravesada por una hojita de acero muy pulida, y fija de una manera invariable, que descansa sobre un plano ó una ranura tambien de acero pulido. Cuando se quiere poner esta péndola en oscilacion, se le separa un poco de la vertical, y se le deja caer en virtud de su propio peso.

Para hacer servir este aparato á la medida del tiempo, se dispone una coleccion de ruedas dentadas que encajan unas en otras, de modo que todas anden, po-

niendo una sola en movimiento; dando al número de dientes de estas ruedas, la relacion que existe entre las diferentes divisiones adoptadas para medir el tiempo, es decir, las horas, minutos y segundos, y adaptando á sus ejes agujas, que moviéndose sobre unas muestras, indican todos los pasos que dan. En seguida se enrosca á uno de estos ejes una cuerda flexible, de la cual se suspende un peso que hace girar todas las ruedas, y que las haria girar con precipitacion si se le permitiese obrar libremente. Para moderar su caida, se adapta á esta coleccion de ruedas una péndola A L, fig. 52, en cuya parte superior hay una especie de áncora E E, que engrana en los dientes de una de las ruedas tiradas por el peso. Esta especie de áncora se llama *escape*, y está dispuesto de modo, que cuando la péndola está vertical y en reposo, sus dos estremos E E, se interponen entre los dientes de la rueda, quitándola todo movimiento; pero separando un poco la péndola á uno ú otro lado de la vertical, la rueda puede girar libremente, y gira en efecto por la accion del peso, hasta que la péndola al caer la detiene por la interposicion del escape. Si todo está dispuesto como debe, esto sucede en el instante de hallarse en el punto mas bajo de su oscilacion; y entonces, pasando al otro lado de la vertical en virtud de la velocidad que ha adquirido, y de la que le comunica el choque de la rueda movida, vuelve á escaparse de nuevo de entre los dientes de esta, y la deja seguir girando, despues vuelve á detenerla de nuevo, y asi sucesivamente, todo el tiempo que dure la accion del peso que hace mover las ruedas.

En las esperiencias de física, en que no se trata mas que de observar las oscilaciones del péndulo sin hacer de él un regulador, se procura aproximarse todo lo posible á la disposicion del péndulo simple, fig. 53. En este caso se emplea una bola de platina muy pesada, suspendida de un hilo de cobre del grueso necesario únicamente para sostener la bola

sin alargarse; el hilo está unido á un pequeño casquillo de cobre del mismo diámetro que la bola, y que colocado sobre esta, con el intermedio de alguna sustancia grasa, se adhiere con bastante fuerza para que la bola no se caiga. Una hojita de acero muy pulido, unida á la parte superior del hilo, descansa sobre planos de agata muy pulimentados, á fin de que su movimiento de oscilacion halle el menor obstáculo que sea posible de parte del roce.

Cuando se pone en movimiento un péndulo semejante se nota al momento que la estension de los arcos que describe disminuyen poco á poco, y acaba por pararse enteramente. Esta detencion sucesiva nace en parte del roce que hay en el punto de suspension, pero aun mucho mas de la resistencia que el aire opone al movimiento de la bola. Esta resistencia, siempre contraria á su velocidad, aumenta la duracion de la semi-oscilacion descendente, y disminuye la de la semi-oscilacion ascendente, en la misma proporcion con corta diferencia; de suerte, que la suma de estas dos mitades viene á ser sensiblemente la misma que si el movimiento se verificase en el vacío; pero las escursiones del móvil disminuyen sucesivamente en su estension. Mas el isocronismo de las oscilaciones circulares no se verifica rigurosamente sino cuando son de una estension constante; luego bajo este punto de vista debe alterarlas la resistencia del aire. Afortunadamente esta alteracion es muy poco sensible cuando los arcos son pequeños, y es fácil en este caso determinar su influencia por el cálculo. Despues, aplicándola como una correccion á las oscilaciones observadas, se reducen todas al caso ideal de una amplitud infinitamente pequeña; lo cual hace á todas exactamente isócronas.

Ahora bien, si despues de haber hecho esta observacion se mide la longitud del péndulo de que se ha hecho uso, y se reduce por medio del cálculo al caso ideal del péndulo simple, se pueden determinar muchos resultados importantes, comparando la du-

racion de las oscilaciones con las longitudes de los péndulos.

El primero es la intensidad absoluta de la gravedad. En efecto, siendo producidas las oscilaciones por su accion, deben ser mas ó menos rápidas, segun su intensidad sea mayor ó menor; y esta intensidad debe conocerse por el número de oscilaciones que se verifican en un tiempo dado, y con un péndulo de un tamaño conocido. Estos dos elementos, el número y la longitud, pueden determinarse con la mayor exactitud, y ofrecen un escelente medio de calcular la energía de la gravedad. De este modo se ha hallado, que en la latitud de París los cuerpos recorren 4,9044 métros en el primer segundo de su caida. La longitud del péndulo simple que hiciese 100000 oscilaciones en un dia medio seria en el observatorio de París de 0,741883 metros.

El cálculo hace tambien conocer, que respecto á varios péndulos simples, de diferentes tamaños, y animados por una misma gravedad, la duracion de las oscilaciones es proporcional á la raíz cuadrada de la longitud de los péndulos; de suerte, que á medida que un péndulo aumenta de longitud, las oscilaciones se hacen mas lentas. Este resultado sirve para determinar la longitud que debe darse á un péndulo para obtener de él oscilaciones de una duracion determinada. En rigor, esta duracion varía por la impresion que hacen el calor y el frio sobre la varilla del péndulo; pero se ha hallado tambien el modo de remediar este inconveniente, como veremos despues.

En fin, se demuestra por medio del cálculo que la duracion de las oscilaciones de un mismo péndulo, sometido sucesivamente á distintas acciones de la gravedad, varían en razon inversa de la raíz cuadrada de sus intensidades; propiedad que nos sirve para comparar las intensidades de la gravedad terrestre en diferentes latitudes. De este modo se ha descubierto que esta intensidad crece yendo desde el

ecuador hácia los polos; lo cual es una consecuencia de la figura de la tierra.

Se observan en la naturaleza un gran número de movimientos, que sin seguir exactamente las mismas leyes que el péndulo, se asemejan á él en la circunstancia de hallarse alternativamente á un lado y á otro de una línea en que se encuentran en el estado de reposo. Tal es, por ejemplo, el de una cuerda metálica estendida, que se haga salir de su posicion natural de equilibrio, abandonándola en seguida á sí misma. Este movimiento y todos los del mismo género, que ordinariamente son muy rápidos, han recibido el nombre de *vibraciones*; y mas adelante estudiaremos algunos de ellos por medio de la esperiencia.

Ultimamente, para acabar de reunir aqui los resultados mas usuales de los movimientos, diremos algo del que puede tomar un cuerpo sólido libre, arrojado por una impulsion primitiva. Si esta pasa por el centro de gravedad del cuerpo, y es la única causa de movimiento que obra sobre él, tomará el cuerpo un movimiento de traslacion en la direccion que le da este impulso, y todas sus partes se moverán uniformemente en este sentido, paralelamente entre sí, y con una velocidad comun; pero si la impulsion no pasa por el centro de gravedad del cuerpo, este toma un movimiento compuesto, 1.º de un movimiento de traslacion uniforme comun á todas sus partes; y 2.º de un movimiento de rotacion igualmente uniforme al rededor de un eje que pasa por su centro de gravedad, pero cuya direccion en el interior de su masa puede ser constante ó variable. En todos los cuerpos sólidos se pueden tirar tres líneas que formen ángulos rectos entre sí, que son otros tantos ejes de rotacion permanentes, es decir, que si la rotacion empieza al rededor de uno de estos ejes, continuará siempre girando al rededor de él, siempre que el cuerpo no esperimente resistencia ni choque que venga á alterar la libertad que he-

mos supuesto en sus movimientos. Todos estos resultados se demuestran en la mecánica matemática.

CAPITULO XII.

Del choque de los cuerpos.

Hasta aqui hemos imaginado para imitar la constitucion de los cuerpos sólidos sistemas de puntos materiales, unidos entre sí de un modo invariable; pero esta rigidez absoluta no se encuentra en la naturaleza. Todos los cuerpos que nos ofrece, y que llamamos sólidos, pueden comprimirse hasta cierto punto sin desunirse ni mudar de naturaleza; mas en este caso no hacen otra cosa que ceder momentáneamente á la fuerza que los oprime, y cuando esta cesa vuelven á tomar su forma primitiva, ó á lo menos se acercan á ella en diversos grados. A esta tendencia se da el nombre de *elasticidad*. Un cuerpo que despues de la compresion volviese á tomar exactamente su figura primitiva seria *perfectamente elástico*, y no lo es sino *imperfectamente* si no hace mas que aproximarse á su primer estado. Luego examinaremos por medio de la esperiencia la clase en que bajo este aspecto deben colocarse los cuerpos naturales y la causa mas probable de su reaccion elástica; pero por el momento, fieles al método que nos hemos propuesto seguir en este libro, no haremos aquí mas que enunciar nociones abstractas sobre los diferentes modos con que pueden estar constituidos los sistemas materiales, á fin de deducir las leyes generales que nacen de la inercia, y que como tales, deberán realizarse tambien en los cuerpos naturales, cualquiera que sea la complicacion de sus propiedades accidentales.

La ausencia ó existencia de la elasticidad, y los diferentes grados en que puede hallarse en un sistema material, tienen una grande influencia sobre el

modo de recibir ó comunicar el movimiento este sistema cuando choca con otros semejantes ó recibe el choque de ellos. Vamos á examinar los casos estremos de ninguna elasticidad y de elasticidad perfecta, entre cuyos límites estan comprendidos todos los demas; y únicamente supondremos para mayor sencillez, que los sistemas que chocan son esferas homogéneas, cuyos centros se mueven uniformemente en una misma línea recta, y cuyos puntos se mueven todos en una direccion paralela á esta recta, sin tener ningun movimiento de rotacion. Sean las que quieran las velocidades y las masas de dos esferas semejantes, necesariamente se han de chocar sobre una misma recta de una manera simétrica, relativamente á todas las partes de su masa, y no podrá resultar de su encuentro otra cosa que un cambio en su movimiento de traslacion, cambio que les hará avanzar mas ó volver atrás con cierta velocidad; único elemento que tenemos que determinar.

Supongamos que nuestras dos esferas son compresibles, pero absolutamente privadas de elasticidad y arrojadas como acabamos de decir. En este caso, cuando lleguen á unirse, el primer efecto de su choque mútuo será comprimirse una contra otra, hasta que la impulsion que animaba á cada una de ellas se haya repartido uniformemente en el conjunto de ambas masas; y cuando esto se haya verificado cesará la compresion, estableciéndose una velocidad comun, que podrá determinarse dividiendo la suma de las cantidades de movimiento de los dos cuerpos antes del choque por la suma de sus masas.

Por ejemplo, si tomando ciertas cantidades conocidas por unidades de velocidad y de masa, la primera esfera tiene 3 partes de velocidad y 8 de masa; lo que hace una cantidad de movimiento igual á 24; y la segunda tiene solo 1 parte de masa y 4 de velocidad; lo que da 4 por cantidad de movimiento: en el caso de que las velocidades esten dirijidas en el mismo sentido la suma de las cantida-

des de movimiento será 28, y 4 la suma de las masas. La velocidad comun despues del choque será $\frac{28}{4}$ ó 7. Si las velocidades tuviesen direcciones opuestas seria solamente $\frac{20}{4}$ ó 5, porque hubiera sido necesario contar como opuestas las cantidades de movimiento.

Los resultados serian tambien los mismos si en vez de moverse las dos esferas en una línea recta describiera una y otra la circunferencia de un mismo círculo. Esto nos proporciona el medio de comprobar por la esperiencia las indicaciones de la teoría suspendiendo esferas compresibles de hilos muy largos fijos en un mismo punto á manera de péndulos, separándolos de la vertical mas ó menos en un mismo plano, y dejándolas caer á un tiempo, de modo que se encuentren en el punto mas bajo de su carrera para poder medir la altura á que suben despues del choque por el otro lado de la vertical. Una vez conocidas estas alturas, la teoría del movimiento del péndulo dará la velocidad de proyeccion que necesitan; y segun la separacion primitiva que se hubiese dado á las dos masas se podrá conocer la velocidad individual que llevaba cada una al llegar al punto mas bajo, esto es, en el momento del choque. Estas alturas se miden por medio de una division circular, paralela al plano en que se verifican los movimientos. Lo único que hay que hacer es elejir cuerpos que se acerquen lo mas posible al estado puramente compresible y no elástico que hemos supuesto. Ordinariamente se hace uso de bolas de greda húmeda y bien amasada, que producen bastante buen efecto; tambien podrian emplearse, y quizá con mayor ventaja, bolas húmedas de harina amasada, que carecen casi absolutamente de elasticidad.

En todos estos ejemplos la comunicacion del movimiento y su reparticion igual por toda la masa exijirá un cierto tiempo, que será tanto menor cuanto menos compresibles sean los cuerpos, es decir,

cuanto mas *duros*; y se puede concebir como límite el caso de una compresibilidad tan débil, que el fenómeno se verificase en un tiempo inapreciable. Este seria el caso de los cuerpos que podrian llamarse *perfectamente duros* y no elásticos. La suposicion de una incompresibilidad absoluta no solo no se encuentra jamas en la realidad, sino que ni aun presentaria medio alguno de concebir la comunicacion del movimiento.

Demos ahora á nuestras dos esferas una compresibilidad y una elasticidad perfectas; y supongamos que se chocan mútuamente en sentido contrario con masas y velocidades iguales. En este caso, al momento que se toquen se detendrán una y otra, puesto que todo es igual en ambos; el punto de su primer contacto será el límite de su carrera, y emplearán su fuerza en comprimirse mútuamente hasta que la hayan consumido del todo. Este esfuerzo disminuirá el tamaño de sus diámetros en la direccion del choque, y aumentará el de los que sean perpendiculares á ella; de modo, que las dos esferas se cambiarán en dos elipsoides aplanados por el punto de contacto: mas luego que haya cesado absolutamente la fuerza del choque, cada uno de estos elipsoides elásticos procurará volver á tomar la forma de esfera, reproduciendo exactamente los mismos esfuerzos que le habian comprimido; y ya sea que se considere que este restablecimiento se hace sobre el punto de contacto, suponiéndole fijo, ya se suponga que se comunica de una esfera á otra, es claro, que despues del restablecimiento cada esfera será repelida en direccion contraria á su movimiento antes del choque con una velocidad igual á la que tenia al verificarse este. Ahora bien, si en lugar de suponer iguales los dos cuerpos se les suponen masas y velocidades diferentes, es claro, que solo se comprimirán mútuamente hasta que hayan llegado á una reparticion igual de velocidad, como sucede en los cuerpos simplemente compresibles; de

donde se sigue, que cada cuerpo no gastará en la compresion mas que el esceso de velocidad primitiva sobre la velocidad comun que resultaria en el estado de compresibilidad; despues de lo cual su reaccion elástica le comunicará esta misma diferencia en sentido contrario, no quedándole en último resultado mas que el esceso de la velocidad comun sobre esta porcion de velocidad perdida y restituida.

Para aplicar este resultado volvamos á tomar el ejemplo numérico que hemos calculado antes respecto á los cuerpos compresibles; y supongamos que las dos velocidades llevan una misma direccion. En este caso hemos visto que la velocidad comun despues del choque es 7; luego si nuestras esferas son elásticas, la primera que tenia 8 por velocidad gastará en la compresion 8 — 7 ó 1 de velocidad; y tomándola en sentido contrario despues del choque no le quedará mas velocidad que 6. Calculando del mismo modo respecto á la otra esfera que tenia solo 4 de velocidad gastará en la compresion 4 — 7 ó — 3; y volviéndolas á tomar en seguida en sentido contrario vendrá á tener por velocidad definitiva 7 + 3 ó 10. De suerte, que las dos esferas continuarán moviéndose en la misma direccion despues del choque, pero la una mas veloz y la otra mas lentamente que antes. El mismo razonamiento nos hará ver, que si los dos cuerpos fuesen iguales en masa estando uno de ellos en reposo y el otro en movimiento, éste quedaria en reposo despues del choque, y el otro tomaria toda su velocidad. Estos resultados pueden comprobarse por aproximacion, sustituyendo en el aparato anterior á las bolas de greda otras de marfil bien esféricas y homogéneas, cuya elasticidad, aunque no es perfecta, es á lo menos muy grande. Si muchas bolas semejantes estan suspendidas de hilos y en contacto unas con otras, separando la primera de la vertical y dejándola caer sobre las otras, la última sola es la que se mueve, y todas las intermedias quedan en reposo, como indica la teoría.

Del mismo modo que hemos considerado el choque de dos esferas podriamos considerar el de dos cuerpos de cualquiera forma; los principios serian los mismos, pero la complicacion del problema seria mucho mayor, pues habriamos de determinar los puntos de choque de ambos cuerpos y la direccion de su compresion. El único ejemplo que presentaremos de este género es el de una esfera que cae sobre un plano.

Desde luego, si suponemos el plano horizontal y la elasticidad de ambos cuerpos perfecta, es evidente que la esfera recibirá por la reaccion despues del choque una velocidad igual á la que tenia en el momento de tocar al plano; y asi esta reaccion deberia hacerla subir en el vacío, precisamente á la altura de donde á caido. Sin embargo, prácticamente, jamas llega la subida á este punto, cualesquiera que sean las sustancias empleadas; tanto por causa de la resistencia del aire, como de la imperfeccion de la elasticidad. Ahora bien, si en lugar de suponer el plano horizontal se le supone inclinado, la esfera debe salir despues de su reaccion, formando con el plano el mismo ángulo que formaba antes del choque; y en efecto, esto es lo que sucede en el primer instante, pues en seguida, obrando la pesantez sobre el móvil le conduce gradualmente hácia la tierra, haciéndole describir una parábola. Esto ofrece un medio muy bueno para demostrar prácticamente las leyes del movimiento de los proyectiles, dejando caer una bola de marfil sobre un tamborcito de pergamino bien igual, muy tirante y diversamente inclinado al horizonte; porque suspendiendo una coleccion de anillos en el camino que debe llevar la bola, y pasando esta por medio de ellos, la parábola se manifiesta claramente á la vista.

La ley de comunicacion del movimiento que hemos esplicado en este capítulo es muy general; y no solo se aplica al choque de los cuerpos, sino á la reparticion de todas las fuerzas imaginables entre las

masas sobre que se les hace obrar. Asi, todo cuerpo que atrae ó comprime á otro es igualmente atraido ó comprimido por él. Si se comprime una piedra con el dedo, el dedo resulta tambien comprimido por la piedra; y el caballo que tira de un peso por medio de una cuerda, es tirado por el peso, pues estando la cuerda que los une igualmente tirante hácia los dos estremos, procura reunirlos á ambos del mismo modo. En el choque de los cuerpos no puede el uno comunicar movimiento al otro sin perderle él mismo; y el cambio no se verifica entre las velocidades, sino entre las cantidades de movimiento. La misma reciprocidad se encuentra en general en todas las acciones que nos presenta la naturaleza; el diamante que atrae al hierro es atraido por él; la tierra ejerce su atraccion sobre la luna, y sufre la que esta ejerce sobre ella. La piedra que cae es atraida y sacada de su lugar por la tierra, á quien atrae y *disloca* á su turno, aunque tan poco en razon de la cortedad de su masa, que no puede percibirse. Este es el resultado universal que Newton ha enunciado como una ley general de la naturaleza, diciendo que *la reaccion es siempre igual y contraria á la accion.*

CAPÍTULO XIII.

Movimientos de los líquidos incompresibles.

Las moléculas materiales que componen los líquidos, consideradas aisladamente unas de otras, estan sujetas á las mismas leyes de movimiento que los simples puntos materiales. Pero cuando una masa líquida está terminada en ciertas partes por las paredes de un vaso susceptibles de resistencia, los movimientos de las partículas se encuentran contrariados por esta resistencia, y de aqui resultan muchas condiciones generales de movimiento que corresponden á toda la masa. Sin embargo, aun en es-

te mismo caso la movilidad de las partículas las permite tomar una infinidad de movimientos propios, que pudiendo nacer de causas ligerísimas, dan al cálculo general de estos fenómenos una complicacion estraordinaria. Asi es que la mayor parte de las cuestiones que se han resuelto hasta aqui lo han sido por medio de consideraciones particulares que restringen su enunciacion, de modo, que no se les puede atacar directamente. Indicaremos en compendio algunos de los resultados que se han descubierto de este modo.

Los mas importantes por su utilidad son los que se refieren al movimiento de un líquido pesado que sale de un vaso sólido por un orificio de forma y tamaño conocido, hecho en el fondo ó en las paredes del vaso. Para analizar cómo se verifica este movimiento, aislemos mentalmente una capa horizontal muy delgada, situada á una altura cualquiera en la masa líquida, y consideremos las fuerzas que obran sobre ella. Desde luego está impelida de alto abajo por su propio peso; y si la forma del vaso fuese exactamente cilíndrica y su fondo estuviese abierto, caeria libremente en virtud de esta sola fuerza, sin que esperimentase ninguna influencia de parte de las capas superiores ó inferiores, que saliendo del estado de reposo al mismo tiempo que ella, y siendo igualmente impelidas por la gravedad, tendrian siempre velocidades exactamente iguales á la suya. Pero cuando es parcial la abertura hecha en el vaso, como sucede ordinariamente, no se verifica esta independencia de movimientos, porque luego que llegan las moléculas que componen cada capa horizontal al nivel del orificio, no pudiendo salir simultáneamente ni al momento que llegan á él, esta detencion influye en el movimiento de las capas superiores. Entonces cada una de estas, ademas de su tendencia propia á bajar, está impelida por la diferencia de las fuerzas motrices que obran sobre sus dos superficies, comunicadas por las porciones su-

periores é inferiores del resto de la masa; y la combinacion de todas ellas es la que determina el movimiento que toma en realidad. Ademas, si el vaso no es cilíndrico en toda su altura es necesario que cada capa horizontal, considerada en el conjunto de sus partículas, se amolde, por decirlo asi, á cada seccion del vaso que atraviesa; y siendo incompresible, su grueso vertical disminuye ó aumenta, á medida que el vaso se ensancha ó se estrecha; lo cual no puede verificarse sin que algunas de sus partículas sean separadas respecto á su posicion horizontal. Lo mismo se verifica cuando llegan cerca del orificio, como puede verse en un vaso transparente, mezclado con el agua que sale, algunos cuerpecillos opacos, como resina ó lacre molido; porque estos globulillos, teniendo la misma densidad del agua, nadan entre sus partículas, casi con igual libertad que las mismas moléculas líquidas; y los movimientos que toman y las direcciones que siguen indican á la vista la direccion de las corrientes que se forman, y por las cuales son arrastrados. Estas corrientes se ve en efecto que se forman cerca del orificio; y aun si este se halla formado por un tubo adicional entrante, como manifiesta la fig. 54, se ve á los globulillos indicadores volver á subir desde el fondo del vaso al punto de salida. En general, aun cuando el orificio está hecho en una pared muy delgada, las moléculas al aproximarse convergen hácia él, de modo, que la *vena fluida* despues de salir va estrechándose hasta cierta distancia del vaso, fig. 56; lo cual no puede verificarse, supuesta la incompresibilidad, sin que se separen algunas de las partículas que componen una misma capa. Pero cuando la forma del vaso es cilíndrica con corta diferencia, y la altura del agua es muy grande con respecto á la diferencia de tamaño de las capas horizontales, lo que hace aumentar la fuerza comprimente, las velocidades horizontales de las partículas liquidas son muy pequeñas con relacion á sus velocidades verti-

cales; y estas últimas son con corta diferencia iguales respecto á todas las moléculas de una misma capa; de suerte, que el caso ideal de una igualdad enteramente completa debe ser como el límite de los que presenta la esperiencia, y por consiguiente debe dar resultados muy poco distantes de la verdad en las circunstancias que hemos supuesto. Esta consideracion particular, introducida en el cálculo, le simplifica lo bastante para poder desenvolver todas sus consecuencias; y de ella se deducen las leyes siguientes, que para evitar complicacion nos limitaremos á enunciarlas respecto al caso ordinario en que el orificio sea muy pequeño en comparacion á las dimensiones de la masa líquida.

Cuando el agua ú otro líquido perfecto sale de un vaso por un orificio muy pequeño, en virtud de su peso, y sin que ninguna presion esterior obre sobre su superficie, la velocidad del líquido al salir es la misma que la de un cuerpo pesado que hubiera caido libremente desde la superficie superior hasta el nivel del orificio. Este resultado, descubierto por Torricelli, se verifica tambien cuando la superficie superior y la del orificio sufren iguales presiones.

Durante la salida cada punto de la masa fluida y de las paredes del vaso sufre una presion sensiblemente igual al peso de la columna fluida, situada sobre su nivel; mas el esceso de las fuerzas estrañas que pueden aplicarse á la superficie superior y esta presion es en cada instante la misma que si el líquido no estuviese en movimiento. Ella es la que imprime su velocidad á las partículas salientes; pero no se la comunica del todo, sino cuando ha podido obrar sobre ellas por cierto tiempo; pues seria preciso que su energía fuese infinita para producir una velocidad finita por medio de una accion absolutamente instantánea. Asi es, que el movimiento de proyeccion de las moléculas que salen por el orificio es al principio insensible y como nulo, y no adquiere su velocidad completa sino despues de algun

tiempo, muy corto, sí, pero que puede apreciarse. Es muy fácil asegurarse de esto observando la salida del agua por un orificio, cuya direccion no sea absolutamente vertical, fig. 56; porque en este caso, como las partículas despues de su salida se hallan impulsadas á un mismo tiempo por la gravedad y por la velocidad de proyeccion que ha recibido al salir, deben describir en el vacío una parábola, y en el aire una curva balística ordinaria, cuya amplitud de tiro variará segun la velocidad de la proyeccion, de suerte, que se puede juzgar de una cosa por la otra. Se ve, en efecto, haciendo la esperiencia, que la amplitud, al principio insensible, aumenta poco á poco hasta un maximum, á que no llega sino despues de algunos instantes.

Las leyes anteriores se aplican igualmente al supuesto de que el vaso se vacie gradualmente á medida que sale el agua, ó bien al de que se mantenga el nivel siempre constante por la adicion de nuevo líquido; y es muy fácil comprobarlo por la esperiencia, sobre todo en este último caso; porque entonces, siendo constante la presion ejercida sobre el orificio, la velocidad de salida lo es tambien; y como esta velocidad se sabe por la altura del agua sobre el orificio, se puede calcular cuántos pies ó metros anda en cada segundo. Multiplicando en seguida este número por la superficie del orificio se conocerá el volúmen del cilindro de agua que sale en un segundo de tiempo, y por consiguiente el volúmen que saldrá en un tiempo cualquiera determinado. No habrá mas que medir la cantidad que realmente ha salido en el mismo tiempo, y comparar estos dos resultados entre sí. Constantemente se halla que el último es menor; y esto nace de la *contraccion de la vena fluida.* Si se considera la línea líquida que sale del centro del orificio como un eje curvilíneo y central de la vena, las secciones hechas en ella perpendicularmente á este eje van disminuyendo desde el orificio hasta cierto punto, que se

llama *seccion contraida*; despues de lo cual la forma de la vena es permanente por algun tiempo, y por último se ensancha en canastillo, mezclándose con el aire. Ahora bien, siendo el líquido incompresible, la desigualdad de las secciones supone necesariamente una desigualdad de velocidad entre las diferentes partículas que componen cada una de ellas, puesto que el sistema general de estas partículas no podria jamas estrecharse simultáneamente, y sí de una manera sucesiva, haciendo la aceleracion de velocidad que pase en un tiempo dado igual cantidad de líquido por un espacio mas pequeño. En efecto, asi es como sucede el fenómeno; las moléculas que parten de los bordes del orificio tienen al principio una velocidad menor que las del centro; su movimiento se acelera á medida que se acercan á la seccion contraida; y en fin, la velocidad de todos los puntos de esta seccion es la misma, y sensiblemente conforme con la que da el cálculo, segun ha esperimentado cuidadosamente Mr. Hachette. Se ve, pues, que en las aplicaciones, la seccion contraida es el verdadero orificio á que pueden aplicarse con mas realidad las leyes obtenidas por la consideracion del paralelismo de las capas. Esto es lo que se hace en las esperiencias, y su uso puede justificarse por una prueba directa; porque si se adapta al vaso un tubo adicional exactamente igual en tamaño y forma á la porcion de la vena fluida, comprendida entre el orificio y la seccion contraida, el producto de la salida no se altera, como tampoco la contraccion, á pesar de que la seccion contraida es entonces orificio. Esta conformidad proporciona el poder determinar la contraccion de la vena indirectamente, pero con mucha mas exactitud que por la medida inmediata de la vena. No hay mas que medir la cantidad absoluta del líquido que ha salido en un tiempo dado bajo una presion constante, y compararla con la que deberia haber salido segun la ley de Torricelli con arreglo á la altura del líquido y al area del orificio

que se ha empleado. Si se divide el esceso del area del orificio sobre la de la seccion contraida por el area del orificio, se tendrá una fraccion que espresará la proporcion que hay entre la superficie de la seccion contraida y la del orificio, que es lo que para abreviar se llama la *contraccion*. La exactitud de este método viene de que sustituye á la medida inmediata de las dimensiones de la vena las del tiempo y producto de la salida, que pueden obtenerse con una gran precision multiplicando las observaciones.

El aparato mas cómodo para esta especie de esperiencias es una gran cuba, en cuyas paredes se adaptan láminas metálicas muy delgadas, horadadas con agujeros de distintos tamaños, que se abren y cierran instantáneamente por el movimiento de otra lámina que anda por una corredera fija en la misma pared. Se llena esta cuba de agua, ó en general, del líquido que quiere observarse; y para mantener el líquido á la misma altura constantemente se hace llegar horizontalmente á aquella altura una corriente continua; y se hace al otro lado de la cuba y á igual altura una abertura que dé libre salida al líquido en el momento que vaya á pasar del punto que se ha fijado. Para obtener regularidad en los fenómenos, es necesario emplear cantidades de líquido bastante considerables para que pueda establecerse y mantenerse invariable la uniformidad de la salida. Entonces, dice Mr. Hachette, que ha hecho un gran número de esperiencias sobre este punto, si el líquido que sale es diáfano, como el agua, la porcion de la vena, que no está desunida por su mezcla con el aire, presenta la apariencia de un cristal puro, cuyas formas geométricas pueden examinarse y medirse con la mas perfecta exactitud; porque aunque las moléculas líquidas se suceden rápidamente, como son continuas y homogéneas parece que estan en un reposo absoluto. Cualquiera que sea la forma del orificio, la curva descrita por el centro de la vena

es siempre la misma, y no difiere sensiblemente de la parábola producida por la diferencia de nivel. Pero todos los demas elementos de la seccion contraida varían segun las circunstancias particulares de la esperiencia, tales como la forma del orificio, su tamaño, la altura del líquido &c. Estamos muy lejos de poder comprender todas estas modificaciones en leyes generales; sin embargo, Mr. Hachette ha estudiado la influencia de cada una, y pueden verse en su memoria los pormenores que se deseen en esta materia.

Sabemos que ciertos cuerpos sumergidos en un líquido se mojan, y otros no se mojan en él. El primer caso indica una adhesion entre las partículas del líquido y las del cuerpo á quien moja; y he aqui una nueva fuerza que puede influir sobre los fenómenos de la salida, tales como los calcùla la teoría. Mas adelante diremos algo de estos efectos, cuando no consideremos los cuerpos de una manera abstracta y mecánica, sino con todas las propiedades de que los ha dotado la naturaleza.

¿Es esta causa, ó simples reacciones mecánicas, ó ambas cosas á un tiempo, lo que produce las considerables variaciones que se observan en la cantidad de líquido que sale por tubos de diversas formas? Habiendo hecho un orificio plano en una porcion de pared delgada y tambien plana, fig. 57, y observado la cantidad de líquido que sale por él en un tiempo dado, encórvese la pared: si la parte cóncava queda mirando al líquido, fig. 58, el producto será mayor que anteriormente; si al contrario, toca al líquido la superficie convexa, fig. 59, el producto será menor. Basta aun para producir alteraciones considerables que los bordes del orificio esten un poco doblados hácia afuera, de suerte, que formen una especie de tubo piramidal muy corto, ABCD, fig. 60, cuya base AB se adapte exactamente á una abertura hecha en la pared plana. Si se coloca este tubito de modo que sus labios queden á la parte de

afuera del líquido, el producto será, por ejemplo, como 100; pero si se le vuelve sobre su base, de modo que la salida quede á la parte de adentro, el producto se reducirá á 71; y la disminucion puede ser aun mayor empleando tubos cilíndricos de un tamaño muy pequeño.

Hemos visto antes, que la vena fluida que sale de un orificio cualquiera describe en el aire una parábola determinada por la direccion, y el todo de la presion de que nace. Esta parábola se convierte en una línea recta si el orificio es horizontal; y el líquido baja ó sube, segun la presion se ejerce de arriba abajo, ó de abajo arriba. Para realizar este último caso, supongamos un vaso vertical ABCD, fig. 61, que comunica por su base con un canal horizontal BC, agujereado por la parte superior en O con un agujero pequeño de cualquier forma. Si se llena de agua el vaso y el canal, y se destapa en seguida el orificio O, el líquido saldrá verticalmente y se tendrá el fenómeno comunísimo de los *surtidores*. La fuerza de impulsion en O será igual á la velocidad que adquiriria un cuerpo pesado, cayendo libremente desde la superficie superior AD del líquido hasta la altura del orificio, ó mas exactamente hasta la de la seccion contraida. Esta fuerza es precisamente la necesaria para hacer subir las partículas líquidas hasta el nivel de la superficie superior; y asi sucederia realmente en el vacío; pero en el aire sube mucho menos, á causa de la resistencia que este fluido opone al movimiento. Segun Mariotte, un caño vertical de 5 pies de altura exije una altura de 5 pies 1 pulgada en el depósito; y respecto á cualquiera otra altura, el esceso de elevacion del depósito crece poco mas ó menos como los cuadrados de esta altura. Por ejemplo, si el surtidor debe tener 100 pies de altura, como 100 contiene á 5 veinte veces, la diferencia en pulgadas será el cuadrado de 20 ó 400 pulgadas, que hacen 33 pies 4 pulgadas; por consiguiente la altura del depósito

deberá ser conforme á esta regla 133 pies 4 pulgadas.

Este cálculo supone que las aberturas de los orificios son suficientes para que el roce del líquido contra sus bordes no retarde sensiblemente su velocidad; lo cual exije que se haga el orificio mayor, á medida que se emplean mayores velocidades. Mariotte ha dado reglas sobre este punto en su *Tratado del movimiento de las aguas*. Es preciso tambien para obtener toda la altura del caño no darle una direccion rigurosamente vertical; porque si las moléculas, despues de llegar á lo alto del canastillo cayesen en la misma línea chocarian con las partículas ascendentes y disminuirian su velocidad. Algunas veces se colocan por diversion cuerpos ligeros en el mismo surtidor, como por ejemplo, huevos vacíos; y la impulsion contínua que reciben los sostiene, haciéndolos girar sobre sí mismos con rapidez. Esta destruccion de velocidad por el choque se verifica igualmente de arriba abajo, cuando se colocan obstáculos sólidos en un caño vertical descendente, como ha observado Mr. Hachette. La cantidad de líquido obtenida disminuye sensiblemente, y tanto mas, cuanto mas cerca del orificio se halla el obstáculo, acaso porque siendo mas exacta la continuidad de las partículas hace mas perfecta la comunicacion del choque. Esta fuerza de impulsion de los surtidores se emplea en las preparaciones anatómicas para introducir hasta en los vasos mas pequeños líquidos teñidos que los hacen sensibles. La mejor disposicion del aparato para este efecto me parece la que ha indicado Mr. Dumeril, y que está representado en la fig. 62, AABB, es un tubo de vidrio vertical, de dos ó tres centímetros de diámetro interior, destinado á servir de depósito: está abierto por arriba y cerrado por la parte de abajo con un tapon de madera ajustado con cera. Este tapon está horadado en su centro para recibir á enchufe otro segundo tubo mas pequeño, como de dos ó tres milímetros de diáme-

tro interior, y dos ó tres centímetros de longitud. Al estremo de este tubo se adapta una manguita flexible de goma elástica, del mismo grueso, y de una longitud doble con corta diferencia, que se ajusta simplemente sobre el tubo, sujetándola con un hilo dado muchas vueltas; en fin, al otro estremo de esta manguita flexible se adapta del mismo modo un tubo de vidrio muy corto, cuyo estremo libre está afilado á la lámpara en forma de un pico muy sutíl. Esto supuesto, si se coloca verticalmente el gran tubo y su apéndice y se le llena de un líquido cualquiera, este líqüido saldrá por el pico abierto con una fuerza de impulsion determinada por la altura de la columna; y teniendo en la mano la manguita de goma se dará al líquido la direccion que se quiera. Ademas se podrá determinar segun se desee el instante de su salida, apretando la manguita entre los dedos, y aflojándola cuando se quiera que se verifique la salida. Asi se podrán buscar con toda libertad los vasitos que se quieran inyectar, introduciendo en ellos el pico capilar con todas las precauciones que exije su delicadeza, y dejar correr el líquido ó contenerle, segun exijan las circunstancias.

La medida de la salida por diversos orificios y bajo presiones diferentes es un elemento de un uso contínuo en la conduccion y distribucion de las aguas; por consiguiente presentaremos las reglas usadas en estas operaciones.

La especie de unidad que ordinariamente se emplea en ellas se llama *pulgada de agua*, y es la cantidad de agua que sale en un minuto por un orificio circular de una pulgada de diámetro, fig. 63, abierto en una pared vertical muy delgada, bajo una presion de 7 líneas de agua, contadas desde el centro de la abertura; lo cual exije que el agua esté 8 líneas mas elevada que este centro en los puntos de la superficie opuestos al orificio, pues en este punto hay un descenso local, que puede graduarse de una línea en las circunstancias que hemos supuesto. La

cantidad de agua que con estas condiciones pasa en un minuto por el orificio de una pulgada es 28 libras de agua, ó 14 pintas antiguas de París; lo que equivale á un cilindro de agua que tuviese una pulgada de diámetro y 880 de altura.

Esta primera medida se subdivide en partes mas pequeñas, como media pulgada, cuarto de pulgada &c., que corresponden á las cantidades de agua, salidas durante un minuto por orificios circulares de aquellas medidas, hechos en una pared delgada, y cuyo centro se halle 7 líneas debajo de la superficie del agua en el parage de la salida. La velocidad de esta es la misma en cualquiera de los casos, á causa de la igualdad de presion; y los volúmenes de agua obtenidos en tiempos iguales son proporcionales á las areas de los orificios circulares, y por consiguiente al cuadrado de sus diámetros. Asi, la media pulgada de agua da la cuarta parte del volúmen de la pulgada de agua, ó 7 libras por minuto; el cuarto de pulgada da la décima sesta parte de la pulgada, ó $1\frac{3}{4}$ libras, y asi sucesivamente. Se emplean tambien como medida las *líneas de agua* que dan $\frac{1}{144}$ del volúmen de la pulgada, porque esta tiene 12 líneas. La forma del orificio es siempre circular, lo cual facilita las comparaciones. Segun estos principios, si se quiere valuar el producto de un arroyo ó de una fuente en pulgadas y líneas de agua, no habrá mas que recojer y medir el agua que dé en un minuto; y dividiendo el número de libras que pese por 28, el cociente será el número de pulgadas de agua. Para obtener el resultado con mas exactitud debe prolongarse la esperiencia durante algunos minutos, y dividir el producto por el número de estos.

Alguna vez puede ocurrir hacer esta valuacion en circunstancias en que seria muy dificil, ó acaso imposible, recibir y medir directamente el agua que pasa en un minuto; y entonces es preciso suplirlo con la observacion de la velocidad. Se arroja sobre la

superficie de la corriente una bolita de cera cargada de modo que se sumerja casi totalmente; despues se observa con un relox de segundos cuántas pulgadas anda esta bola en cada minuto; y dividiendo el producto por 880, el cociente espresará el número de *pulgadas de agua* que daria una seccion circular de una pulgada de diámetro en el parage de la corriente que se ha observado. Esta reduccion es necesaria, porque la esperiencia prueba que la velocidad del agua no es enteramente la misma en lo interior que en la superficie. Todos los valores anteriores de la pulgada de agua y de sus subdivisiones estan tomados suponiendo la salida bajo una presion de 7 líneas de agua, contadas desde el centro de la abertura circular; pero si esta altura debiese de ser otra se podria calcular con anticipacion el producto por la regla de Torricelli, esto es, proporcionalmente al cuadrado de las alturas. Asi se sabrá, por ejemplo, que 28 líneas de presion en lugar de 7 darán un producto doble, 63 darán uno triple, y asi sucesivamente.

La última cuestion que consideraremos aqui, relativamente al movimiento de los líquidos, es la de la propagacion de las hondas. Cuando se toca un punto de la superficie de una agua tranquila, ó despues de haber metido en ella el estremo de un cuerpo sólido, si se retira este de pronto, es bien sabido, que al rededor de este centro de conmocion se forman una multitud de honditas, que se estienden rápidamente hácia todas partes. Es claro que esta transmision del movimiento debe poderse deducir mecánicamente de la constitucion física de los líquidos; y lo ha hecho Mr. Poisson, respecto al caso en que la conmocion es producida por la estraccion de un cuerpo sumergido en el agua, llegando á obtener las siguientes consecuencias. Hay siempre dos especies de hondas que se forman al rededor del centro de conmocion. Las unas son independientes de su estension; nacen en el mis-

mo instante en un número infinito, y se propagan igualmente en todos sentidos con velocidades uniformemente aceleradas, como las de los cuerpos graves; solo que la energía de la velocidad es diferente respecto á las diversas hondas, y las mas rápidas son las mas protuberantes. Mas esta protuberancia se debilita ensanchándose, al paso que se estienden; y tanto por esta circunstancia como por la rapidez de su movimiento, es verosímil que jamas se perciben las hondas de esta clase. Pero al mismo tiempo se forman otras hondas mas lentas, que dependen del primitivo sacudimiento, y que pueden apreciarse por que siguen otras leyes. Estas hondas son tambien en número infinito, y nacen juntas en el centro de conmocion, de donde se propagan con velocidades desiguales; de suerte, que las mas protuberantes son tambien las mas rápidas; pero se diferencian de las primeras en que sus velocidades son constantes y su propagacion uniforme; y ademas, su protuberancia disminuye de tal modo en proporcion de su rapidez, que solo pueden observarse las primeras. La degradacion de las velocidades sigue la misma ley en todas las series de hondas; pero su rapidez absoluta depende de la estension de la conmocion primitiva, por ejemplo, de la seccion del cuerpo sumerjido hecha á flor del agua; y si esta seccion es circular, es inversa de la raíz cuadrada de su diámetro. En el movimiento de una misma honda su altura disminuye á medida que se separa del centro de conmocion; y esta disminucion sigue la razon inversa del tiempo si el fluido está libre, y de su raíz cuadrada si está encerrado en un canal. Por efecto de la desigualdad de velocidades las hondas se separan gradualmente unas de otras; y el espacio que las separa se aumenta cada vez mas durante el movimiento; pero ademas cada honda está festoneada en forma de una curva serpenteante, conservando sus partes entre sí distancias invariables, siempre muy pequeñas, y proporcionales al tamaño de la conmocion

primitiva. Esta circunstancia hace las hondas mas salientes en apariencia, y facilitan la observacion de sus movimientos. Tal es la precision de los resultados del analisis matemático, cuando se dirije sabiamente. La dependencia que indica Mr. Poisson entre la velocidad de la propagacion, y el tamaño de la seccion á flor de agua, la habia yo observado hace mucho tiempo en una serie de esperiencias que hice con sólidos de revolucion de diversas formas que sumergía en el agua á diferentes profundidades, todas muy pequeñas, y que retiraba súbitamente. Luego cuando estos sólidos (sean conos, esferas, elipsoides ó paraboloides), estaban sumergidos á una profundidad tal que su seccion á flor de agua era la misma en todos, el tiempo de la propagacion de la primera onda sensible era tambien el mismo; en vez de que era diferente si variaba el tamaño de la seccion á flor de agua. Seria muy interesante comprobar del mismo modo por la esperiencia las demas indicaciones de la teoría.

CAPITULO XIV.

De los movimientos de los cuerpos sólidos, en los fluidos resistentes.

Un cuerpo sólido que se mueve en un fluido material empuja delante de sí las moléculas que encuentra en su camino, y en esto gasta una parte de su movimiento, pues en virtud de la inercia de la materia, la velocidad producida por una fuerza determinada, disminuye en proporcion á la cantidad de materia que tiene que mover. Asi es, que en el caso actual, si se multiplica cada molécula del cuerpo y del líquido por su velocidad, la suma de estos productos deberá ser constante en todas los instantes del movimiento; y suponiendo que el cuerpo sólido hubiese recibido solamente una impresion primitiva incapaz de renovarse, la perderia poco á po-

co de este modo. Esta reparticion del movimiento, constituye lo que se llama resistencia de los líquidos incompresibles.

Su ley seria muy fácil de conocer, si las moléculas líquidas impelidas, se separasen al momento del cuerpo impelente sin volver á circular á su rededor, y sin escitar en las moléculas inmediatas ninguna agitacion que pudiera influir en su movimiento. En efecto, en esta suposicion, consideremos el móvil en un punto cualquiera de su carrera en que tenga una velocidad determinada, y dividamos el tiempo en intervalos bastante pequeños para que en cada uno de ellos, no pierda sino una parte infinitamente pequeña de su velocidad. Entonces, en el primer instante que siga al que nosotros consideramos, el móvil chocará contra cierto número de partículas del fluido resistente, á las que comunicará alguna velocidad, y puesto que suponemos que se aniquilan respecto á él, inmediatamente despues del choque, es evidente que si en esta misma época tuviese una velocidad doble, chocaria en el mismo tiempo contra un número doble de partículas, á cada una de las cuales comunicaria una velocidad tambien doble, á lo menos, prescindiendo de la cantidad infinitamente pequeña que debe perder la suya por el choque, de suerte que la cantidad total del movimiento comunicado seria cuadrupla. El mismo razonamiento hace ver que en general esta cantidad será proporcional al cuadrado de la velocidad del cuerpo. Ahora bien, las partículas del fluido no pueden adquirir tal movimiento sin que el cuerpo le pierda, y esto es lo que constituye su resistencia, la cual será por lo mismo proporcional al cuadrado de la velocidad del cuerpo, y será necesario hacerla entrar en el cálculo de los fenómenos, como una fuerza retardatriz que obra conforme á esta ley. Esto es lo que la esperiencia confirma en las circunstancias que por la sencillez se acercan á nuestra suposicion, es decir, en las cuales las moléculas impelidas, no vuelven á

influir de un modo sensible sobre el movimiento del líquido, y en general cualquiera que sea la complicacion de las circunstancias, se puede emplear siempre la resistencia proporcional al cuadrado de la velocidad, como una aproximacion que contiene el elemento principal de los resultados.

Para manifestar con un ejemplo como modifica los fenómenos la introduccion de esta fuerza, consideremos su accion sobre la caida de los cuerpos. Cuando un cuerpo pesado cae libremente en el vacío, la gravedad que le empuja siempre con la misma energía, le añade á cada instante un pequeño aumento, igual á la velocidad que ha adquirido, y de aqui resulta el progreso de su aceleracion. Pero si el cuerpo cae en un fluido resistente, la accion que la pesantez ejerce sobre él, se halla á cada instante combatida, y disminuida en una pequeña cantidad que podemos suponer proporcional al cuadrado de la velocidad adquirida. Si el cuerpo sale del estado de reposo, esta fuerza retardatriz es al principio nula, y asi el movimiento debe empezar acelerándose; pero al momento se desenvuelve con la velocidad, y detiene la aceleracion. En fin, si el movimiento continúa bastante tiempo, llega un término en que la energía retardatriz de la resistencia iguala al esfuerzo total de la gravedad, y entonces el cuerpo continúa moviéndose tan solo en virtud de la velocidad que ha adquirido, y como si absolutamente careciese de peso; su movimiento se hace uniforme y su velocidad constante. Esto és lo que se observa en todos los cuerpos que caen por dentro de un líquido bastante profundo para poder llegar á esta uniformidad. La velocidad constante es proporcional á la raiz cuadrada de la densidad del cuerpo, é inversa de la raiz cuadrada de la densidad del fluido resistente, de donde resulta que en el mismo fluido, los cuerpos mas densos deben caer con mayor velocidad. Un cuerpo mas ligero que el líquido en que se le sumerge, obra exactamente del mismo modo al

subir, su movimiento es al principio acelerado, pero despues de algun tiempo su velocidad se fija, y desde entonces continúa elevándose uniformemente, hasta que llega á la superficie libre. Los líquidos producen aun otra especie de resistencia que proviene de la adherencia de sus partículas entre sí, y con los cuerpos que se mueven en ellos. Esta resistencia, análoga al roce, es constante en cada líquido, é independiente de la velocidad; por consiguiente solo la esperiencia puede hacerla conocer, y mas adelante espondremos los medios de valuarla de este modo.

Cuando los cuerpos que nadan en la superficie de los líquidos se separan algo por poco que sea, de su posicion natural de equilibrio, oscilan alternativamente á una y otra parte de esta posicion, durante un cierto tiempo dependiente de su densidad, y de la separacion que se le ha dado. Tal es el caso de un barco, que inmóvil al principio, es movido por una impulsion del viento ó de una ola. Estos movimientos puede determinarse por el cálculo, y su teoría indica las reglas que deben seguirse para asegurar la estabilidad de los buques.

CAPITULO XV.

De los movimientos de los fluidos aeriformes.

Hemos llamado fluidos aeriformes compresibles, aquellos cuyas partículas estan separadas unas de otras á bastante distancia, y por una fuerza repulsiva bastante enérgica para permitir que les hagamos soportar condensaciones muy grandes sin violar la ley de la impenetrabilidad, ni aun modificar en nada su constitucion gaseosa. Como todos los fluidos de este género ejercen una accion contra las fuerzas que los comprimen, resulta que la menor conmocion escitada en un solo punto de su masa, se propaga de una en otra partícula á la masa entera. Luego veremos que estas conmociones propagadas

por el aire, son las que llegando á nuestro oido escitan en nosotros la sensacion del sonido. Pero esta hermosa aplicacion de las leyes del movimiento, no puede establecerse solidamente sino despues de haber determinado por la esperiencia, las propiedades fisicas del aire y de las otras sustancias gaseosas, asi como el modo con que resisten á la compresion.

Los fluidos aeriformes oponen tambien al movimiento de los cuerpos una resistencia que nace de su inercia, de su reaccion elástica, y de su viscosidad, que por pequeña que sea, no puede ser absolutamente nula. Por esto los cuerpos pesados que caen ó se elevan en ellos adquieren despues de cierto tiempo una velocidad constante. Un ejemplo notable de esto se observa en las personas que se dejan caer de una grande altura con un paracaidas.

LIBRO II.

ESPOSICION DE LOS FENÓMENOS GENERALES, Y DE LOS MEDIOS DE OBSERVACION, COMUNES A TODAS LAS CIENCIAS DE ESPERIENCIA.

En los capítulos que acaban de leerse hemos establecido las condiciones abstractas del equilibrio y del movimiento respecto á sistemas de partículas materiales inertes, sujetas á las diferentes maneras de agregacion que distinguen los cuerpos sólidos, líquidos y aeriformes. Ahora vamos á salir de estas abstracciones, para considerar estos mismos cuerpos, tales como existen en la naturaleza, y con todas las propiedades ya generales, ya particulares, de que se hallan dotados. Trataremos de determinar por medio de la esperiencia, la especie y la accion de las fuer-

zas de que resultan estas propiedades; y aplicándoles las leyes abstractas que hemos establecido en general, procuremos deducir de ellas los fenómenos que deberan resultar. Esta deduccion, cuando sea posible, nos hará penetrar en la esencia misma de los fenómenos, cuyas relaciones describirá, y cuando una complicacion escesiva de datos la haga incompleta, la union que establecerá, aunque parcial é interrumpida en diferentes puntos, nos ofrecerá un socorro sumamente útil, fijando un pequeño número de hechos principales á cuyo rededor deberán colocarse todos los demas. Tal es la marcha de la verdadera fisica, de la única que es sólida y durable. La observacion y la esperiencia, le proporcionan los materiales, el razonamiento los ordena, y el cálculo los combina. No pudiendo hacer aqui un uso directo de este poderoso instrumento, consultaremos al menos sus resultados como indicaciones de un guia fiel, y adaptándolos á nuestras observaciones, podremos seguir aun el encadenamiento de las consecuencias tan allá como puede llegar nuestra débil inteligencia, cuando no tiene el recurso de los signos para facilitar sus operaciones.

CAPÍTULO PRIMERO.

De los procedimientos que se emplean para medir la estension.

No hay ciencia alguna de observacion, en la que no se necesite medir continuamente largos, anchos, gruesos, y dividir líneas rectas y circulares en partes iguales. Es preciso, pues, ante todo, instruirnos en los métodos prácticos de ejecutar estas diferentes operaciones.

Los dos instrumentos mas sencillos que sirven para este uso, son el compas y la regla, representados en la fig. 1. La regla sirve para trazar lineas rectas, y el compas para marcar círculos, y dividir

su contorno y el de las líneas rectas en partes iguales. Habiendo dado á las piernas del compas una abertura determinada, se coloca sucesivamente sobre las partes consecutivas de una línea recta ó circular, de modo que se ponga cada punta en el punto que anteriormente ocupaba la otra, la línea recorrida de este modo, se hallará dividida en partes iguales, cuyo tamaño dependerá de la abertura arbitraria que se haya dado al compas.

Trazada de este modo una escala de partes iguales, se puede subdividir en partes mas pequeñas que esten en una relacion dada, por ejemplo la mitad, el tercio, ó el décimo de las primeras, repitiendo otra vez la operacion, pero entonces es preciso dar al compas una abertura, que sea exactamente la fraccion que se desea, de la que tenia primero. Esto se consigue, por medio de varios ensayos, tomando la abertura que parezca conveniente, llevándola sobre la escala el número de veces indicado por la fraccion á que se quiere reducir, y viendo si el último paso del instrumento le lleva mas allá ó mas acá del límite prescrito. Segun lo que suceda, se abren ó cierran un poco mas las piernas del compas, y últimamente se fijan en la abertura que parece dar la coincidencia con mayor exactitud.

Pero hay un método muy ingenioso, debido á un geómetra frances llamado Vernier, por medio del cual se puede devidir con facilidad una escala de partes iguales en otras mas pequeñas, y aun de una pequeñez indefinida. Este método consiste en aplicar á la division propuesta otra division, cuyas partes tienen con las de la primera una relacion conocida, y el defecto de coincidencia de las señales que limitan las divisiones correspondientes indica la fraccion en que mutuamente se esceden. Un ejemplo hará esto mas inteligible. Sea LL, fig. 2, una regla dividida en partes iguales, 01, 12, 23 &c. Si se quiere hacer uso de esta regla para medir una longitud dada mas pequeña que ella, por ejemplo, la línea

AB, se verá por la simple superposicion, que esta línea tiene 9 divisiones enteras de la regla, mas una pequeña fraccion representada por el intervalo bB, en que escede el punto B, á la 9.ª division de la regla; pero no se conocerá el tamaño absoluto de esta fraccion, ni su relacion con una division entera. Para determinarle, construiremos otra regla V V fig. 3, dividida tambien en partes iguales, pero mas pequeñas que las primeras en una proporcion conocida; tal, por ejemplo, que 9 divisiones de la regla mayor equivalgan á 10 de la pequeña, ó del *Vernier*. Si colocamos este á lo largo de la regla como representa la figura, la 1.ª de sus divisiones, marcada con O, coincidirá con la 1.ª de la regla, marcada tambien O, y la division 10 del vernier, coincidirá con la division 9 de la regla; pero las divisiones intermedias no podrá coincidir. La segunda division del vernier, estará mas atras de la 2.ª de la regla, una cantidad igual á la diferencia de estas divisiones, es decir $\frac{1}{10}$ D, representando por la letra D, la estension de una division de la regla. Del mismo modo la 3.ª division del vernier estará mas atras que la 3.ª de la regla, $\frac{1}{10}$ D; y sucesivamente la separacion de las siguientes divisiones será de $\frac{3}{10}$ D, $\frac{4}{10}$ D, $\frac{5}{10}$ D, $\frac{6}{10}$ D, $\frac{7}{10}$ D, $\frac{8}{10}$ D, $\frac{9}{10}$ D, y el fin $\frac{10}{10}$ D, ó D. Esta última diferencia debe ser igual en efecto, á una division entera D, pues por la construccion el 11.º trazo del vernier, coincide con el 10.º de la regla.

Supongamos ahora que se empuja suavemente el vernier á lo largo de la regla, fig. 4, de modo que la coincidencia se verifique en el 2.º trazo, marcado por el número 1; es claro que el segundo trazo del vernier se ha adelantado una cantidad igual á $\frac{1}{10}$ D, pues esta era su distancia á la 1.ª division en la posicion anterior. Cada una de las demas divisiones del vernier, se habrá adelantado igual cantidad, pues todas se hallan á distancias invariables; y asi sus separaciones estarán ahora indicadas por $-\frac{1}{10}$ D, o, $+\frac{1}{10}$ D, $\frac{2}{10}$ D, $\frac{3}{10}$ D, $\frac{4}{10}$ D, $\frac{5}{10}$ D, $\frac{6}{10}$ D, $\frac{7}{10}$ D, $\frac{8}{10}$ D,

y en fin $\frac{9}{10}$ D; de manera que la division 1.ª es la única que coincide con las divisiones de la regla.

Si en esta posicion el punto B, cayese precisamente en la estremidad de la 10.ª division del vernier, esto es, sobre el 11.º trazo, se inferiria con certeza que la fraccioncilla b B, era igual á $\frac{1}{10}$ D; y la longitud total de la línea A B seria 9 divisiones y $\frac{1}{10}$ de la regla grande.

Pero si esta coincidencia no se verifica, no hay mas que hacer correr al vernier otra division, es decir, ponerle de modo que su 2.ª division coincida con la de la regla, fig. 5. Por este movimiento, cada trazo se habrá adelantado otra nueva cantidad igual á $\frac{1}{10}$ D, de modo que sus separaciones de las divisiones correspondientes de la regla, serán $-\frac{2}{10}$ D, $-\frac{1}{10}$ D, 0, $+\frac{1}{10}$ D, $\frac{2}{10}$ D, $\frac{3}{10}$ D, $\frac{4}{10}$ D, $\frac{5}{10}$ D, $\frac{6}{10}$ D, $\frac{7}{10}$ D, y en fin $\frac{8}{10}$ D. Si en esta nueva posicion el punto B, corresponde exactamente con el fin de la 10.ª division del vernier, ó el trazo 11.º se inferirá que pasa de la 9.ª division de la regla una cantidad igual á $\frac{2}{10}$ D, esto es, dos décimas de una division, y por consiguiente la línea A B contendrá 9 divisiones y $\frac{2}{10}$ de la regla.

Si en esta 2.ª posicion la 10.ª division del vernier no coincidiese con el punto B, se empujaria el vernier otra division aun, y si entonces coincidia, diriamos que la línea A B tenia 9 divisiones y $\frac{3}{10}$ de la regla, y asi sucesivamente. Por tanto, si el esceso del punto B, sobre la 9.ª division de la regla, es una de las fracciones $\frac{1}{10}$ D, $\frac{2}{10}$ D &c., se valuará exactamente por este método.

Pero si cae entre dos de estos valores no se medirá exactamente. Por ejemplo, si el esceso b B, es mayor que $\frac{6}{10}$ D, y menor que $\frac{7}{10}$ D, se hallará que el punto B no llega al hacer coincidir la 6.ª division, y pasa haciendo coincidir la 7.ª Entonces se valuará la diferencia por aproximacion, viendo á cual de ambas divisiones se acerca mas la coincidencia; y esta diferencia se añadirá á $\frac{6}{10}$ D, ó se disminuirá de

$\frac{7}{10}$ D. Hablando en rigor, la medida que se obtenga de este modo no será exacta, pero el error será menor que $\frac{1}{10}$ D, pues el valor exacto está comprendido entre dos espresiones que se diferencian en esta cantidad. Es claro que se llevaria mas allá la exactitud, si el vernier abrazase un número mayor de divisiones de la regla, pues entonces seria menor la diferencia entre estas divisiones y las de la regla; y por consiguiente seria tambien menor la distancia de una á otra coincidencia; pero hay que poner un límite á esta precision por la dificultad de observar exactamente sobre que divisiones se verifica la coincidencia, dificultad que se aumenta á medida que son menores las diferencias entre las partes de la regla y las del vernier.

Este se aplica igualmente á las divisiones circulares, como son las de los limbos de los círculos metálicos que sirven para observar los ángulos (*). Entonces se hacen circulares, y concéntricos á la division del instrumento. Véase la fig. 6. Es evidente que su propiedad no se altera por esta modificacion; asi es que se usan del mismo modo, y se valuan sus indicaciones como en las divisiones rectilíneas.

En todos los casos es absolutamente indispensable para que las indicaciones sean exactas, que el borde rectilíneo ó circular del vernier se aplique exactamente á la division cuyas partes quieren subdividirse; y para esto se le ajusta á otras piezas que arreglen exactamente su marcha á esta condicion. Ademas es preciso que su movimiento sea lento, y graduado con bastante delicadeza para poderle conducir exactamente á las diversas coincidencias. Con este objeto se le hace mover por medio de una rosca, dispuesta como representa la fig. 7. Esta rosca no está torneada en toda su longitud, y en uno de

(*) La aplicacion de este método á las divisiones circulares, se debe al portugues Pedro Nuñez, razon por la cual se llama generalmente en español *Nuñez* á esta parte del instrumento.

los puntos de su parte lisa, tiene un filetito R por el cual se fija con un puentecillo CC, al instrumento, de modo que no puede hacer otra cosa que girar sobre su eje, sin ir adelante ni atras. Su estremo torneado entra en una tuerquecita unida á la pieza V V en que está trazado el vernier, la cual puede avanzar ó retroceder en una correderita paralela al eje de la rosca. Si se agarra esta por su cabeza T T, y se la hace girar sobre su eje, ha de entrar ó salir de la tuerca, y por lo mismo atraerla ó separarla, y de consiguiente mover el vernier á que está unida.

La rosca no se emplea aqui sino como un medio de producir un movimiento lento y graduado segun se quiera. Pero suponiendo que esté hecha con toda la perfeccion á que puede llegar el arte, su mismo movimiento de revolucion, puede ser un medio de subdivision. Porque si el puentecillo que asegura la rosca la ciñe con exactitud, y la tuerquecita unida á la pieza V V, está trabajada con esmero, es claro que á cada vuelta entera de la rosca, esta pieza avanzará ó retrocederá una cantidad igual á la que hay entre cada dos filetes de la rosca, y á cada mitad ó cuarto de vuelta, andará igualmente la mitad ó la cuarta parte de aquella cantidad. Se podrán, pues, determinar estas fracciones, marcando sobre la cabeza de la rosca una division circular de partes iguales, y refiriendo su marcha á un índice fijo F F, unido á las partes inmóviles del instrumento, fig. 8. Si la division, es por ejemplo de 1000 partes, haciendo girar la rosca una sola, se hará avanzar la pieza $\frac{1}{1000}$ de uno de sus pasos; de suerte que suponiendo el paso, de un milímetro, la mudanza de sitio, seria una milésima parte de esta cantidad. Este método se usa muy comunmente en las investigaciones de física y de astronomía. Exige, si, en el trabajo de las rocas una grande exactitud, que se obtiene haciendo girar largo tiempo sobre un torno, la rosca metida en la tuerca que ha de tener, é interponiendo esmeril entre ambos cuerpos, á fin de

que las superficies en contacto se gasten mútuamente, y lleguen á convenir perfectamente entre sí. Para esto se compone la tuerca de dos piezas, que al principio no abrazan toda la circunferencia de la rosca, y que se van apretando mas y mas por medio de otras roscas laterales, á medida que la principal se adelgaza por el roce.

La rosca perfeccionada de este modo puede aplicarse felizmente á la medida del grueso de las láminas, y tal es el objeto del aparato representado en la fig. 9. Este instrumento inventado por Mr. Cauchoix para medir la curbatura de los vidrios esféricos, ha recibido de su autor el nombre de *esferómetro*. Se compone esencialmente de tres brazos de acero horizontales que forman entre sí ángulos de 120 grados; á los estremos de estos tres brazos, y perpendicularmente á su direccion, se hallan tres varitas de acero, cuyos estremos adelgazados cilíndricamente y torneados con suma exactitud, se terminan en tres planos de cortísima estension. En el centro de los tres brazos hay una rosca muy bien trabajada, en cuya cabeza está un círculo graduado. Fácil es concebir cómo se puede comprobar la igualdad de la curvatura de los vidrios con este instrumento, pues si habiendo colocado las puntas sobre el vidrio, se hace girar la rosca hasta que le toque tambien, la menor alteracion en la curvatura habrá de notarse en el momento en que no toque uno de los cuatro puntos. Si no toca la rosca, la rotacion del instrumento producirá un roce áspero, y dará un sonido muy diferente del que daba antes; y si no tocan las puntas, no hallándose sostenido sino por su centro, el instrumento bamboleará de un modo que no dará lugar á equivocarse. La exactitud de estos dos índices es verdaderamente increible; ningun otro procedimiento conocido en las artes puede comparársele. Para convencerse de ello, no hay mas que colocar el esferómetro sobre un vidrio plano, en seguida conducir la rosca á un contacto exacto, y se-

pararla un poco á un lado ú otro hasta que se note la falta de contacto, y mirando entonces sobre el índice causará admiracion el ver lo poco que se ha movido.

Segun este principio, se puede comprobar fácilmente si la superficie de un vidrio que se supone plano, lo es realmente ó no. Conducida la rosca hasta el contacto en un punto cualquiera de esta superficie, no habrá mas que pasear el instrumento por todas las partes del vidrio sin tocar á la rosca, y ver si el contacto subsiste siempre con la misma precision.

Supongamos que se verifica asi. Si se introduce entre el plano del vidrio y la punta de la rosca una lámina de estas paralelas, por delgada que sea, es claro que el esferómetro bamboleará. La cantidad que haya que hacer girar la rosca para volver á hallar el contacto como antes, determinará el grueso de la lámina interpuesta. Pero esta operacion podria romper la lámina si fuese muy delgada, y en general alterarla siendo de materia capaz de arandarse, y para evitarlo no se coloca inmediatamente debajo de la rosca. Se pone primero esta sobre un pedazo de vidrio plano de caras paralelas, cuya igualdad de grueso se haya comprobado con el mismo instrumento; en seguida se introduce entre este vidrio, y el grande en que descansan las puntas del instrumento, la lámina que se quiere medir, y se lleva la rosca exactamente al punto de contacto: la diferencia que marque el índice hará conocer el grueso de la lámina, sin que esta haya corrido el mas pequeño riesgo, por grande que sea su fragilidad.

En fin, sucede muchas veces en las esperiencias, que es necesario comparar exactamente la longitud de dos reglas que deben servir de medida, ó en general las divisiones homólogas de dos cuerpos, sea para asegurarse de que son iguales, sea para medir su diferencia si la tienen. Para esto hay un instrumento muy útil, que se llama el *comparador*, fig. 10. Se compone de una regla metálica T R, que debe ser

bien recta y bastante fuerte para no doblarse de un modo sensible; esta regla tiene en uno de sus estremos un talon fijo T que sirve para apoyar uno de los estremos de las medidas que se comparan, una especie de batidor R R, corre todo lo largo de la regla. y puede fijarse en el punto que se quiera por medio de dos tornillos de presion. Este bastidor es la parte esencial del comparador; y tiene un gorron fijo *c* al rededor del cual gira la palanca, *bcb'*, cuyos dos brazos *b c*, b' c tienen longitudes desiguales que son entre sí, por ejemplo, como 1 á 10. De aqui se sigue que haciendo mover el estremo *b* del brazo menor, una cantidad muy pequeña, el estremo del brazo mayor *b'* describe al rededor del centro comun *c* un arco 10 veces mayor. Para medir este movimiento está unido al bastidor un arco circular D D, dividido por ejemplo, en quintos de milímetro, y se fija al estremo del brazo *b'* un vernier que proporciona valuar las décimas de esta division, y por consiguiente hasta $\frac{1}{50}$ de milímetro. Como los movimientos del punto *b'*, son decuplos de los del punto *b*, se ve que cada parte indicada por el vernier corresponde á $\frac{1}{500}$ de milímetro.

Ahora bien, cuando se quieren comparar por medio de este instrumento las longitudes de dos reglas B, B' muy poco diferentes, se coloca una de ellas, por ejemplo B, sobre el comparador, de modo que descanse libremente sobre su superficie, y que uno de sus estremos esté apoyado contra el talon T; se conduce el bastidor hácia el otro estremo de la regla, y se oprime contra ella hasta que el vernier, corresponda poco mas ó menos al medio de la division. Entonces se aprietan los tornillos de presion, y se nota exactamente la division á que corresponde el índice del vernier. Hecho esto, sin tocar al bastidor, se saca la 1.ª regla B, y se le substituye la 2.ª B': el brazo pequeño de la palanca *b*, impelido por un resorte, viene á apoyarse en el estremo de la 2.ª regla, y se ve la division en que se halla el índice

Si las dos reglas son exactamente iguales, esta division será la misma que en la operacion precedente; pero si son desiguales será otra, y la variacion del índice indicará su diferencia.

Esta esperiencia para ser exacta, exige una precaucion indispensable. Todos saben que las dimensiones de los cuerpos varían segun los diversos grados de frio ó calor que sufren. Pronto trataremos de indagar la causa y la medida de este fenómeno; pero por ahora le admitiremos solamente como un hecho, cuyas pruebas se ofrecen cada momento á nuestra vista. Esto supuesto, una barra metálica, no tiene exactamente la misma longitud en las diferentes estaciones del año, ni en las alternativas de frio y de calor á que se la puede esponer. Asi que, cuando se la quiera comparar con otra, es preciso fijar con cuidado las circunstancias particulares en que se halla en el momento de la observacion, pues estas circunstancias determinan la longitud actual. No tardaremos en descubrir los medios de fijar estas circunstancias; pero entre tanto diremos que deben tomarse todas las precauciones posibles, á fin de hacer que sean iguales en las dos reglas que se quieren comparar, para lo cual conviene trabajar en una pieza bastante grande con el fin de que la presencia del observador no la caliente sensiblemente; y para ello es preciso que esta pieza no esté espuesta inmediatamente al calor de los rayos del sol, ó á lo menos que esté resguardada lo mas posible, y al efecto deben dejarse en ella las reglas algunas horas, para que se pongan en el tono general de temperatura de los cuerpos que las rodean y del mismo comparador. En fin, es necesario dejar en cada operacion algun tiempo la regla sobre el comparador para que pierda el esceso de calor que se la ha podido comunicar tirándola. Tomando todas estas precauciones, se puede estar seguro de que las circunstancias sensibles de calor y frio, son las mismas respecto á las dos reglas que se comparan, y no falta mas que fijar exactamente la indicacion de es-

tas circunstancias y de su estado comun, para lo cual sirve un instrumento llamado *termómetro*, que esplicaremos despues. El comparador solo puede aplicarse á reglas terminadas, y puede ocurrir que haya que comparar longitudes comprendidas entre dos señales hechas en una superficie plana. Para conseguirlo hay tambien un método, que esplicaremos cuando hayamos hecho conocer los instrumentos de óptica llamados *microscopios*.

CAPÍTULO II.

De la balanza y del modo de servirse de ella.

Despues de haber medido las dimensiones de los cuerpos, lo que mas necesita el físico es saber determinar las relaciones de sus masas, pues es necesario que cuente con ellas para apreciar la intensidad de las fuerzas que producen los fenómenos. Hemos visto en el capítulo 9, página 66, cómo se pueden deducir estas relaciones por la comparacion de los pesos, y hemos dicho que la igualdad de los pesos se comprueba fácilmente suspendiéndolos de los estremos de una palanca, cuyo centro está fijo, y cuyos brazos son iguales. Tal es la disposicion general de los instrumentos llamados *balanzas*. Vamos á esplicar únicamente aquellos cuya construccion es tan perfecta, que pueden servir á los físicos y á los químicos.

La palanca de estas balanzas, ó lo que comunmente se llama *cruz*, es una barra de acero templado L L′, fig. 11, á la que se da una gran fuerza, á fin de que no esperimente una flexion sensible con los pesos que ha de sostener. Sea G su centro de gravedad, se procura hacer de modo que las dos partes G L, G L′, situadas á una y otra parte de este punto, llamadas *brazos* de la balanza, sean exactamente iguales en tamaño y figura. A los dos estremos L L′, de estos brazos, se unen unos cordones

destinados á sostener los platillos A, A′, que son tambien exactamente iguales entre sí. Para hacer sensibles los menores movimientos del fiel se le pone una aguja SO, llamada *fiel* perpendicular á L L′ en la direccion vertical que pasa por el centro de gravedad G. Todo este aparato está sostenido en un punto C, situado en la misma vertical; y para que su movilidad sea mas perfecta, y no esté sostenido, por decirlo asi, mas que en un punto, se da á la pieza de suspension C la forma de un cuchillo de acero muy duro, cuyo corte descansa sobre un plano horizontal, tambien de acero pulido.

Ahora bien, es claro que si se consiguiese establecer una igualdad perfecta entre todas las partes de este instrumento, colocadas á uno y otro lado del punto G, el equilibrio se verificaria naturalmenmente cuando la barra L L′ estuviese en una situacion horizontal, porque el centro de gravedad del sistema se hallaria entonces en la vertical del punto C; por consiguiente, para conocer si dos pesos eran iguales bastaria colocarlos en los platillos de la balanza, y ver si el equilibrio se mantenia sin alteracion, es decir, si la barra L L′ volvia á tomar la misma posicion horizontal que antes.

Pero para poder hacer esta observacion hay que guardar una condicion esencial en la construccion de la balanza, á saber, que el punto de suspension C se halle un poco mas arriba del centro de gravedad G. Verificada esta condicion, cuando el fiel se separe de la vertical, tratará de volver á ella por medio de una serie de oscilaciones; pero si por al contrario, el centro de gravedad G se hallase mas alto que el punto de suspension, por poco que se separase de la vertical del punto C, nada podria hacerle volver á ella, y el fiel caeria indefinidamente por el lado que fuese mayor la gravedad. Esta movilidad indefinida impediria el obtener el equilibrio; pues no es posible establecer la igualdad de los pesos de una manera enteramente exacta, sino solo

aproximadamente, y de modo, que los errores que pueda haber sean tan pequeños, que se puedan considerar como nulos en las comparaciones que se hagan y en las consecuencias que se puedan sacar de ellas.

Sujetándose, pues, á la condicion anterior, y suponiendo una perfecta igualdad entre todas las partes correspondientes de la balanza se tendria una que seria perfecta. Pero esta igualdad es quimérica, y jamas puede conseguirse por mas cuidado que se ponga en la construccion: asi, es preciso saber pasarse sin ella, y felizmente se la puede suplir sin alterar nada la exactitud del modo que vamos á esplicar.

Pesar un cuerpo es determinar cuántas veces contiene el peso de este cuerpo á otra especie de peso conocido, por ejemplo, de gramos ó fracciones de gramo. Para saberlo empezaremos colocando este cuerpo, que llamaremos M, en uno de los platillos de la balanza, por ejemplo, en el platillo A. Despues trataremos de equilibrarle, poniendo en el platillo A′ algunos cuerpos pesados, como pedazos de cobre ó granos de plomo, y despues hojitas delgadas de cobre batido, y pedacitos de papel que añadiremos sucesivamente, hasta que el fiel SO esté perfectamente vertical, indicando asi la horizontalidad de LL.′ Hecho esto, quitaremos el cuerpo M, y sustituiremos en su lugar gramos y fracciones suyas, hasta que el fiel SO se halle de nuevo en una posicion vertical; la cantidad de gramos que necesitemos poner espresará exactamente el peso del cuerpo M, pues los nuevos pesos colocados en las mismas circunstancias que él, equilibran igualmente el platillo A′ con los cuerpos que hemos colocado en él. Se ve, pues, que este método es independiente del tamaño de los brazos de palanca CL, CL′, asi como de la desigualdad de su peso. Para ser perfectamente exacto exije solo dos condiciones.

La primera es que los puntos de suspension L

L′ sean rigurosamente los mismos en ambas operaciones. En efecto, el poder de un mismo peso para hacer girar el fiel es distinto, segun se le coloque á mas ó menos distancia del centro de suspension; luego si el punto de suspension del platillo A varía en las dos operaciones, es claro, que en la segunda será preciso emplear un peso diferente del del cuerpo M para equilibrar el platillo A′ con los pesos que se han puesto en él; y como no hay ningun índice que nos marque esta desigualdad se podria caer en graves errores. Por tanto, el artista debe emplear el mayor cuidado en establecer y asegurar la constancia de los puntos de suspension L L.′ El mejor medio de conseguirlo es hacer que esta suspension se verifique sobre cuchillitos de acero atravesados, como representa la fig. 12, pues entonces, determinándose los puntos L L′ por el cruzamiento de los dos cuchillos que descansan por el corte uno en otro se hallan tan fijos é invariables cómo se puede desear, sobre todo cuando la barra L L′ se halla en la posicion horizontal. De este modo estan dispuestas las escelentes balanzas de Fortin.

La segunda condicion que hay que observar es que la balanza sea muy sensible, es decir, que cuando se halle cargada y en equilibrio, el menor peso que se coloque en uno ú otro de sus platillos baste para destruir este equilibrio y hacer mover la aguja SO. Esta sensibilidad depende únicamente del punto de suspension C, y será tanto mas perfecta, cuanto menor sea el roce del cuchillo C con el plano que le sostiene, porque el roce que resulta de la superposicion de estos dos cuerpos es una fuerza que obra en la direccion de sus superficies, y que se opone á las demas fuerzas que traten de desunir estas superficies; y asi, el roce del cuchillo C con el plano debe oponerse á que el fiel SO gire libremente al rededor del punto C. En efecto, esta rotacion no puede verificarse sin separar unas de otras las partes que se tocan del cuchillo y del plano; es necesaria,

pues, una fuerza para destruir su adhesion, y por consiguiente la aguja no se moverá sino cuando se haya añadido al platillo el peso necesario para vencer esta resistencia.

Para disminuirla se dá al cuchillo un corte muy fino, y se bruñe el plano lo mas posible; y á fin de que estas piezas no se alteren oprimiéndose contínuamente una á otra, se disponen debajo de los brazos de la balanza dos horquillas, F F′, que en los intervalos de las esperiencias la sostienen en una posicion horizontal sin levantarla. Estas horquillas se mueven por medio de una manijita; cuando se quiere hacer uso de la balanza se las hace bajar, y el fiel queda libre, y sus brazos pueden tomar movimiento; y cuando se acaba la observacion se hacen subir las horquillas, y se conduce la balanza á la horizontalidad y al reposo. En fin, para evitar los movimientos accidentales producidos por las agitaciones del aire se encierra todo el instrumento en una caja de vidrio, en que se dejan solo las aberturas necesarias para colocar los pesos y los cuerpos que se quieren pesar. Es útil poner dentro de esta caja otra cajita llena de cal viva, de muriate de cal, ó de cualquiera otra sal, á propósito para atraer la humedad del aire, y se tiene cuidado de renovarla de cuando en cuando: por este médio se mantiene seco el interior del instrumento, y no se toman las piezas de acero de que se compone.

Se ve tambien que para disminuir su volúmen conviene dirijir la aguja de arriba abajo, como está en la fig. 13, en que se ha representado todo el aparato. Esta disposicion presenta tambien la ventaja de hacer mas fácil la observacion de sus movimientos. Para observarlos exactamente se traza al pie del instrumento, y perpendicularmente á la columna que le sostiene, una division horizontal de partes iguales, sobre la cual oscila el estremo inferior del fiel cuando está próximo á ponerse en equilibrio; pues este no se establece sino despues de

una larga serie de oscilaciones muy lentas. El o de la division está colocado en la vertical del punto C; y se conoce que la balanza está en equilibrio, ó va á llegar á él, cuando las oscilaciones de la aguja son muy pequeñas, y se estienden igualmente á uno y otro lado del o de la division. Entonces no es preciso esperar que el movimiento de oscilacion de la balanza haya cesado enteramente, pues basta conducir en la segunda vez la oscilacion entre los mismos términos. Tambien debe tenerse mucho cuidado de no dar sacudida al instrumento al tiempo de quitar el cuerpo M para reemplazarle con los pesos; pues una sacudida semejante podria cambiar la especie de contacto del cuchillo C con el plano, y por consiguiente el roce entre estas dos piezas; de donde resultaria una variacion en el esceso de peso necesario para vencer este roce: en vez de que permaneciendo el mismo en ambas operaciones, su efecto no impide que se puedan comparar exactamente; y por tanto se puede asegurar que la masa de los pesos que reemplazan al cuerpo M es exactamente igual á la de este.

Para pasar con seguridad de una operacion á otra es necesario, despues de hecha la primera, elevar suavemente las horquillas, á fin de poner el fiel en reposo sin descargar la balanza: despues, sin quitar el peso M, se pone en el platillo en que está colocado, ó mejor en otro platillo auxiliar *a* otro cuerpo cualquiera, cuyo peso sea con corta diferencia la mitad del suyo. Hecho esto se quita el cuerpo M; se le reemplaza aproximativamente por el número de gramos que se presume debe pesar, y se quita tambien el cuerpo estraño que se habia añadido, solo para mantener el contacto del cuchillo con el plano y conservar la inercia del fiel. Entonces se bajan las horquillas: el fiel vuelve á quedar libre y con el mismo grado de movilidad que la primera vez; y siendo todas las circunstancias exactamente iguales á las anteriores se busca el equilibrio del mismo modo.

El artista que construye la balanza tiene cuidado de que el o de la division que recorre la aguja este exactamente en la vertical del centro de suspension: es necesario, pues, buscar esta vertical cuando se monta la balanza, ó lo que es lo mismo, poner horizontal la lámina sobre que está trazada la division; para lo cual se hace uso de un nivel de aire, que se pone sobre esta division calzando la mesa en que está puesta la balanza, hasta que el nivel indique la horizontalidad, que debe verificarse en todos sentidos, á fin de que el plano que sostiene el cuchillito sea tambien perfectamente horizontal. Verificadas estas condiciones, la balanza tiene toda su sensibilidad, está en el caso de obrar, y cada vez que se llega al equilibrio, las oscilaciones son lentas, regulares, y se estienden á iguales distancias á una y otra parte del o de la division. Las balanzas de esta especie, construidas por Fortin, son sensibles en tal grado, que cargadas con mil gramos en cada platillo, un solo milígramo basta para hacerlas perder el equilibrio.

Hemos querido entrar en todos estos pormenores, porque la determinacion exacta de los pesos es uno de los elementos mas importantes de la física, siendo preciso apelar á ella á cada momento. El método de pesar en dos veces, que acabamos de esplicar, se debe á Borda; es fácil y seguro, y el único que en la práctica es independiente de la desigualdad de los brazos de la balanza y del efecto del roce. Empleándole con las precauciones que hemos esplicado se obtendrán los pesos de los cuerpos en el momento de la operacion con toda la exactitud posible; pero repitiéndola en diferentes ocasiones sobre un mismo cuerpo se hallarán algunas variaciones, sobre todo si su volúmen es bastante considerable y su peso pequeño. Esto proviene de que las operaciones se hacen en el aire, que como veremos muy pronto, es un fluido pesado. Hemos visto en el libro primero que los cuerpos sumergidos en un fluido pierden

una parte de su peso igual á la del volúmen de fluido que desalojan; por consiguiente, cuando pesamos lòs cuerpos en el aire no obtenemos realmente su peso absoluto, sino la diferencia de su peso y el de un volúmen igual de aire. Este, veremos por esperiencia que no tiene siempre un mismo peso en igual volúmen junto á la superficie de la tierra, porque hay una infinidad de causas accidentales que le dilatan ó le condensan: estas variaciones deben, pues, alterar la pérdida de peso de los cuerpos; y por consiguiente, para obtener el valor verdadero del peso de estos cuerpos es preciso añadir al resultado que se obtenga con la balanza el peso variable del volúmen de aire que desalojan; y en una palabra, reducirlos al mismo caso que si se pesasen en el vacío. Esto mismo haremos despues; pero para llegar á este estado necesitamos adquirir un gran número de conocimientos esperimentales que nos faltan. Solo hemos indicado aqui, conforme á la esperiencia, la necesidad de estas reducciones para obtener los pesos constantes y absolutos de los cuerpos; despues aprenderemos por la misma esperiencia cómo pueden efectuarse estas reducciones.

CAPÍTULO III.

De la construccion del termómetro, y del modo de servirse de él.

Desde que se empieza á fijar la atencion en el conjunto de fenómenos fisicos y químicos, se ve que el agente mas poderoso, el mas activo, y el mas comunmente empleado en la naturaleza y en las artes, es el fuego. A cada instante sentimos los efectos que produce sobre nuestros órganos, ya cuando nos quema por su demasiado ardor, ya cuando nos calienta dulcemente en los rigores del invierno. Calienta todas las sustancias, y si no las abrasa, las funde, las liquida, las enrojece, las hace hervir, y las con-

vierte en vapores. Aun cuando parece que obra con menos energía, estiende las dimensiones de los cuerpos, cambia su volúmen, y los modifica sin cesar en sus propiedades mas ocultas. Para poder observar estas propiedades de un modo comparable en diferentes cuerpos, ó en el mismo cuerpo en épocas diversas, es preciso no perder de vista esta causa perpetua de variacion; y pues no podemos impedirla que obre, á lo menos debemos buscar algun medio de marcar exactamente el estado en que tiene á los cuerpos en el momento que los observamos.

Antes de todo reduzcamos esta causa á su espresion mas abstracta. Aunque la palabra *fuego* parece que lleva consigo la idea de llama y la de luz, sin embargo, es fácil conocer que todos los fenómenos que acabamos de describir pueden producirse sin el concurso de estas dos circunstancias; porque si hacemos derretir una porcion de plomo en un vaso de hierro por medio del fuego, este plomo, que no estará inflamado, ni despedirá luz, será, sin embargo, capaz de comunicar calor á otros cuerpos; hará derretirse al hielo, al azufre y al estaño; hará cocer el agua y los demas liquidos, y los convertirá en vapor. Y puesto que obra de este modo sin luz ni llama, podemos mentalmente separar estas dos modificaciones del principio que produce tales efectos: y para fijar esta separacion de un modo invariable, y designar aisladamente este principio, le daremos un nombre particular, llamándole *calórico.*

Esta distincion simple y natural nos conduce á ver, que la palabra *calor*, en que ordinariamente se encierra la idea vaga de una causa, no espresa realmente sino la sensacion que el calórico produce en nuestros órganos; y por estension, la que produce sobre otros organos mas resistentes, y aun sobre cuerpos no organizados. Per consiguiente emplearemos de aqui adelante la palabra *calor* únicamente en esta acepcion, esto es, para espresar generalmente la especie de accion propia del calórico.

Pero la sensacion del calor no la esperimentamos siempre con la misma energía; y hay diferentes grados entre la dulce sensacion que nos produce un baño caliente y la que nos quema al tocar un hierro encendido: el calor que escita un solo carbon hecho ascua basta para inflamar el azufre, y no para hacer fundir el cobre ó la plata. A fin de distinguir las diferentes energías del calórico en estas diversas circunstancias les daremos el nombre de *temperaturas*; y las llamaremos temperaturas mas ó menos calientes, segun sean capaces de producir en nosotros ó en los demas cuerpos sensaciones mas ó menos vivas de calor. Con esto no pretendemos mas que espresar la desigualdad de estas sensaciones y de sus efectos, sin medirla ni fijarla; y sin pretender de ningun modo inferir su dependencia del calórico que las produce. Todo esto no puede determinarse con seguridad, sino valiéndose de medidas exactas que buscaremos despues; pero antes es preciso á lo menos conocer la necesidad de buscarlas.

Sucede frecuentemente que los que introducen en las ciencias una espresion nueva para manifestar la causa desconocida de un fenómeno separan en seguida esta definicion de su sentido abstracto para realizarla y darla cuerpo; esto es precisamente lo que ha sucedido con el calórico. La mayor parte de los físicos y químicos consideran el calórico como una materia, á que atribuyen muchas propiedades análogas á las que poseen las demas sustancias materiales, como la elasticidad, la compresibilidad, y la facultad de entrar en combinacion con otros cuerpos. Estas propiedades materiales se las suponen por analogía, pues no pudiéndose ver ni pesar el calórico, se hallan precisados, aun considerándole como materia, á privarle, respecto á nuestros sentidos, de las propiedades mas aparentes y seguras para hacernos conocer la existencia de los cuerpos, es decir, la pesantez y la impenetrabilidad. Otros físicos, en número mas pequeño, han mirado el calorico, no co-

mo una materia, sino como un principio de movimiento, que escita en las partículas de los cuerpos ciertas vibraciones muy pequeñas; de donde resultan los fenómenos y la sensacion que esperimentamos de calor. En fin, un pequeñísimo número de físicos geómetras, sin seguir una ni otra opinion, se han limitado á admitir los principios que son comunes á ambas. Luego examinaremos por la esperiencia las probabilidades de estas diferentes hipótesis; tomaremos de cada una de ellas las analogías en que se funda; y despues de haberlas confirmado con la esperiencia deduciremos de ellas leyes generales y seguras, á las que habrán de arreglarse todos los fenómenos. Pero hasta entonces, y aun entonces mismo, nos limitaremos escrupulosamente al sentido abstracto de las denominaciones que hemos adoptado; y el calórico no será para nosotros mas que la causa de la sensacion del calor; ni la palabra temperatura espresará mas que los diferentes grados de energía de su accion.

De este modo nos hallamos embarazados siempre que queremos remontarnos á las primeras causas de los fenómenos: el objeto de nuestra ciencia es separar la duda, haciéndola recaer únicamente sobre los objetos á que no puede, ó á lo menos no ha podido llegar hasta ahora nuestra razon. El arte de las esperiencias consiste en descubrir entre todos los fenómenos cuáles son los mas generales y de mayor influencia; y estos, bien comprobados y exactamente reconocidos, nos sirven despues de principios para llegar á los demas hechos, como á otras tantas consecuencias. En tal caso nuestras dudas no recaen ya sobre los fenómenos generales, ni sobre su combinacion, únicas cosas que nos son realmente útiles, sino solo sobre las causas primeras de un pequeño número de hechos; y ya que sean inevitables, á lo menos queden reducidas á sus justos límites. Observamos que los fenómenos se suceden como las generaciones de los hombres en un órden que conoce-

mos, pero cuyo origen no podemos esplicar ni aun concebir; seguimos los eslabones de una cadena infinita, y podemos subir de uno á otro, con tal que no la abandonemos; pero el punto de que se halla suspendida la cadena es siempre inaccesible á nuestras débiles manos.

Para descubrir y fijar las relaciones naturales que los fenómenos tienen entre sí, no basta observarlos de una manera vaga, y envolverlos en hipótesis siempre vacilantes é inciertas; es preciso determinar de una manera exacta la naturaleza y estension de sus efectos, á fin de no tener que combinar en nuestros razonamientos mas que datos rigurosos; en una palabra, es menester medirlos. Medir y pesar son los dos grandes secretos de la química y de la física, y las causas de todos los descubrimientos que se han hecho en estos últimos tiempos.

Pero para fijar por medio de medidas exactas los diferentes grados de accion del calórico ¿elejiremos los efectos devoradores y destructivos que ejerce sobre casi todos los cuerpos de la naturaleza? Sin duda que no; pues la misma alteracion que produce en la constitucion de los cuerpos escluiria toda idea de comparacion. ¿Hallaremos términos mas fijos en las sensaciones variables de calor y frio que esperimentamos? Tampoco. No es preciso haber reflexionado mucho sobre la naturaleza de nuestras sensaciones para conocer que las indicaciones que nos dan son puramente relativas. La luz que basta para hacernos distinguir los objetos en un teatro, en que hemos estado ya algun rato nos parece una completa oscuridad cuando nuestros ojos acaban de recibir la luz del dia: un tiempo blando enmedio del invierno nos parece sumamente templado, y nos pareceria un frio insoportable si lo esperimentásemos de repente enmedio de los calores del verano. Asi es, que la temperatura de los subterráneos nos parece fria en verano y caliente en invierno, aunque en realidad es constantemente la misma. Se ve, pues,

por estos ejemplos que los diversos grados de intensidad de nuestras sensaciones no pueden darnos una medida constante de las causas que los producen, puesto que la idea que nos dan es siempre relativa.

Nos vemos, pues, obligados á elejir entre los fenómenos producidos por el calórico, aquellos, que ejerciéndose sobre sustancias inorgánicas, los modifican momentáneamente de un modo que puede reconocerse sin alterar su naturaleza ni su constitucion íntima; de suerte, que quitada la causa vuelven los cuerpos á tomar su primer estado, sea el que quiera el número de variaciones pasageras á que se les ha espuesto. Ahora bien, existe un fenómeno, cuya causa principal es el calórico, que llena exactamente estas condiciones, á saber, lo que se llama dilatacion de los cuerpos.

Es un hecho general y fácil de comprobar, que todos los cuerpos al calentarse se estienden en todos sentidos, de modo, que ocupan un volúmen mas considerable que anteriormente, sin cambiar por eso de naturaleza. Esta modificacion de los cuerpos se llama *dilatacion*, y cuando un cuerpo la esperimenta se dice que se *dilata*. Todos los cuerpos, cualquiera que sea su naturaleza, son susceptibles de sufrir esta modificacion.

La dilatacion de los cuerpos sólidos, particularmente de los metales, es muy pequeña hasta que se acercan al estado de fusion, y sin embargo, sus efectos se hacen sensibles en una multitud de esperiencias comunes. En los grandes conductos de agua, en que se emplean tubos de metal fundido unidos con tornillos de hierro, la diferencia de calor en el invierno ó en el verano hace variar de tal modo las dimensiones de esta larga barra metálica, que es preciso colocar de trecho en trecho otros tubos que pueden escurrirse unos en otros para prestarse á los efectos de estas dilataciones y contracciones alternativas, sin lo cual se romperian infaliblemente. Los

aparatos de este género se llaman compensadores; y se usan igualmente en la construccion de los puentes de hierro. La dilatacion de los metales hace tambien que las varas de los péndulos se alarguen en verano y se acorten en invierno, de modo, que ya hacen avanzar su movimiento, ya le hacen retardar, siendo preciso correjir estos dos estremos, á menos que no se haya prevenido el efecto de estas variaciones por un método que esplicaremos á su tiempo.

La dilatacion de los líquidos es mucho mas considerable que la de los sólidos en iguales circunstancias. Un vaso, aunque sea de bronce, lleno de agua y bien tapado, reventará infaliblemente con una gran esplosion si se le espone á un fuerte calor, de modo, que el agua no pueda salirse por ningun intersticio; lo cual prueba que el agua encerrada se dilata mucho mas que la materia del vaso. Pero para observar estos efectos de una manera mas fácil y menos peligrosa, se toma una redomita de vidrio delgado, y que tenga ancho el cuerpo y el cuello estrecho; se llena entera ó casi enteramente de agua ó de cualquier otro líquido, y se acerca gradualmente al fuego. Al momento se ve dilatarse el líquido, elevarse por el cuello de la redoma, llenarse del todo, y verterse por cima de los bordes mucho tiempo antes de hervir. Cuanto mas estrecho es el cuello, con respecto á la capacidad de la redoma, mas pronta es la esperiencia y mas sensible el efecto; asi, lo mas propio para estas esperiencias es una esfera de vidrio formada al estremo de un tubo, cuyo interior sea muy estrecho. Entonces, observando con atencion, se nota con sorpresa que en el primer momento de la accion del calórico el líquido baja en el tubo en lugar de subir; lo que proviene de que esperimentando primero el calor, la sustancia del vidrio es la primera que se dilata ántes que el líquido haya sufrido la misma accion; pero continuando el calor penetrando por todas partes el líquido empieza á dilatarse, y no tarda en tener una di-

latacion mayor que la del vidrio.

Igualmente se pueden hacer sensibles los efectos de la dilatacion y de la contraccion en las sustancias aeriformes, es decir, cuya constitucion es análoga á la del aire y de los vapores. Por ejemplo, la fuerza elástica del vapor del agua es quien hace mover los embolos de las bombas de fuego; pero para limitarnos á esperiencias usuales propondremos otro ejemplo. Todo el mundo sabe cuán dificil es introducir un líquido en un frasquito, cuyo cuello sea muy estrecho, como los que se usan para las esencias; esto proviene de la resistencia del aire interior, que hallando el pequeño orificio del tubo tapado por la columnita de líquido que se ha introducido en él, se opone de una manera invencible á que pueda pasar. Mas caliéntese el frasquito; calentándose tambien el aire que contiene se dilatará mas que el vidrio, el volúmen del frasquito no bastará para contenerle, y por consiguiente saldrá fuera una parte de él; vuélvase el frasquito sobre el líquido que se quiere introducir, y espérense algunos instantes; el aire que quedó en el frasquito se enfriará, se contraerá, y dejará lugar al líquido, que se introducirá para ocupar el sitio que ha quedado vacío por la presion que el aire esterior ejerce sobre todos los cuerpos, como veremos luego.

Midiendo con cuidado las dimensiones de los cuerpos despues de haberlos espuesto á diferentes temperaturas se halla en general que mientras el fuego no haya alterado su naturaleza vuelven á tener exactamente las mismas dimensiones que al principio, sea el que quiera el número de veces que hayan sufrido estas variaciones alternativas. Esta propiedad se observa en los metales cuando se les calienta hasta fundirlos, y en los líquidos cuando no se les calienta hasta hacerlos hervir. (*) Verdad es

(*) Para reconocer esta propiedad en los liquidos es preciso observarlos en tubos cerrados por todas partes, á fin de que el

que la arcilla y algunas otras sustancias se contraen esponiéndolas al fuego despues de haberlas empapado en agua; pero entonces no vuelven á tomar sus primeras dimensiones; lo cual prueba que su contraccion es efecto del desecamiento que sufren ó de una combinacion mas íntima de sus elementos, y no un efecto pasagero del calor. Este fenómeno se llama *retraimiento*, y es preciso contar con él en la construccion de los vasos de tierra y de porcelana; sin lo cual no tendrian al salir del horno la forma que se les quiere dar; pero por su causa se ve que no son una escepcion de las leyes generales de la dilatacion de los cuerpos.

Esta propiedad comun á todos los cuerpos de dilatarse por efecto del calor, y volver á las mismas dimensiones que antes cuando vuelven á las mismas circunstancias ofrece un medio muy simple y exacto para medir los grados de calor; y se le ha empleado del modo mas feliz para la construccion de los instrumentos llamados *termómetros*, es decir, *medidores del calor*. Todo el mundo los conoce y los usa; pero no son tan generalmente conocidos los principios en que se fundan, y que aseguran la certeza de sus indicaciones.

En rigor, podrian emplearse todos los cuerpos con este objeto, pues como acabamos de ver, todos son sensibles á las variaciones del calor; pero para hacer un instrumento exacto y cómodo es preciso hacer eleccion entre ellos. Si empleamos un cuerpo sólido, por ejemplo, una barra metálica, sus dilataciones y contracciones serán demasiado pequeñas para poderlas notar fácilmente; y si queremos percibirlas será preciso aumentarlas por medio de ruedas

calor no se lleve parte de ellos, reduciéndolos á vapores. Con esta precaucion se halla que mientras no cambien de constitucion interna, es decir, mientras continúen formando la misma sustancia que al principio, vuelven á tener exactamente las mismas dimensiones, siempre que la temperatura vuelva á ser la misma.

y palancas que harán muy minuciosa su observacion y muchas veces inexacta. Si por el contrario, empleamos para construir nuestro termómetro una sustancia aeriforme, por ejemplo, el aire ó cualquiera otro gas, las dilataciones y contracciones serán tan considerables, que habrá de ser muy incómodo el medirlas cuando las variaciones de calor sean bastante grandes. Las variaciones de volúmen de los líquidos, mayores que las de los cuerpos sólidos, y menores que las de los gases, ofrecen un término medio, exento de ambos inconvenientes, y por lo mismo debemos buscar con que formar nuestro termómetro en esta clase intermedia de cuerpos.

Hay uno entre todos ellos, á quien sus cualidades físicas y químicas hacen el mas propio para este objeto, que es el que se llama *mercurio* ó azogue. El mercurio sufre sin hervir mas calor que ningun otro fluido, escepto algunos aceites; y se puede esponer sin que se hiele á grados de frio que helarian cualquier otro líquido, escepto algunos licores espirituosos, como el espíritu de vino ó el eter. Ademas, el mercurio tiene la ventaja de ser mas sensible á la accion del calor que ningun otro líquido; y en fin, las variaciones de su volúmen en los límites en que se hallan comprendidos los fenómenos mas usuales son, como veremos, perfectamente regulares y proporcionales á las que en circunstancias semejantes sufren los sólidos y los gases. Todas estas propiedades deben decidirnos á usar del mercurio para la construccion de nuestros termómetros con preferencia á cualquier otro cuerpo.

Pero para que todos los termómetros de mercurio lleven una marcha igual, y sean comparables unos con otros en todos los paises del mundo, es preciso que la sustancia empleada sea constantemente la misma, y que tenga propiedades constantemente semejantes. Esto se consigue empleando el mercurio en su estado de mayor pureza. El mercurio puro es un verdadero metal líquido, que pesa como

unas trece veces y media mas que el agua en igual volúmen; casi nunca se encuentra en este estado de pureza en el comercio, pues ordinariamente tiene en disolucion algunas partes de plata, plomo, estaño ó cobre, metales con quienes se combina fácilmente. Para purificarle es preciso ante todo, separarla de la tierra, piedras y demas porquerías que se pueden hallar groseramente mezcladas con él; para lo cual basta encerrarle en un pedazo de gamuza, formando una especie de muñequita, y apretarle fuertemente entre los dedos; el mercurio comprimido sale por los poros imperceptibles de la piel, á manera de una lluvia de plata, dejando en esta operacion todo lo que estaba simplemente mezclado con él; pero no combinado con su sustancia.

Para separar ahora los metales que pueden hallarse combinados con él, se aprovecha la propiedad de que apenas son estos metales susceptibles de convertirse en vapor por el fuego mas vivo, al paso que el mercurio hierve y se reduce á vapores á un grado de calor no muy considerable. Se calienta pues la aligacion en vasos cerrados y dispuestos de modo que puedan condensarse por el enfriamiento los vapores que se formen en ellos, y recogerse el líquido que resulte. El calor volatiliza el mercurio sin poder volatilizar los metales que estaban combinados con él, y se hace una separacion quedando los metales en el fondo del vaso, y el mercurio puro se halla en el refrigerante.

Cuando se quiere aplicar esta operacion á cantidades pequeñas, como las que ordinariamente se necesitan en los usos de la química, y de la física, se coloca el mercurio impuro en una pequeña retorta de vidrio ó porcelana, y se reciben los vapores en una esfera de vidrio que se hace comunicar con la retorta por medio de un tubo tambien de vidrio. Se une este al cuello de la retorta por un lado, y á la esfera por otro, se embola, y el aparato queda completamente cerrado. Se enciende debajo de la redo-

ma un fuego de calor muy débil al principio, y cuya actividad se aumenta gradualmente, y se coloca la esfera en agua fria ó hielo quebrantado, á fin de condensar por el enfriamiento los vapores que se formen; se ve, pues, que el tubo de prolongacion es necesario para separar la retorta que se calienta de la esfera que se enfria. Es conveniente que el tubo sea de vidrio ó porcelana, que son sustancias que transmiten con dificultad el calor, y ademas es útil que vaya bajando desde la retorta á la esfera para que los vapores que se condensen en él puedan correr al receptáculo sin volver á caer en la retorta, donde seria necesario convertirlos de nuevo en vapor.

Luego que de este modo se ha obtenido el mercurio bien puro, es necesario encerrarle en un instrumento que haga sensibles sus dilataciones y contracciones, y que permita observarlas fácilmente. Para esto se forma una bolita de vidrio vacía al estremo de un tubo muy fino; se llena de mercurio la bola y una parte del tubo; y como segun esta disposicion la capacidad de la bola es muy considerable con relacion al diámetro interior del tubo, es claro que una dilatacion muy pequeña en el volúmen de mercurio que contiene, se manifiesta en el tubo por una variacion visible en la columna fluida. Asi se pueden hacer sensibles las menores variaciones del calor; pero la ejecucion de esta idea tan simple exige muchas atenciones.

Lo primero es menester formar la bola. Para esto se funde el estremo del tubo á la lámpara; se redondea en forma de boton, amasándola con una varita de cobre ó de hierro, y soplando con la boca por el estremo abierto del tubo, se estiende en forma de esfera la parte fundida. Pero esta última parte de la operacion tiene el inconveniente de introducir humedad en el tubo, que despues cuesta mucho trabajo estraer; y por otra parte es muy dificil el formar asi la bola al estremo de un tubo tan estrecho. En lugar de esto se introduce el estremo abier-

to del tubo en una botita de caut-chuc ó goma elástica, y se ata bien este cuello á su rededor, de modo que ajuste exactamente. Despues, cuando se ha fundido ya la otra estremidad del tubo, y se ha formado y redondeado bien el boton, se pone el tubo vertical, de modo que la parte fria quede en alto, y se aprieta la botita con la mano; el aire seco que esta contiene hará el efecto del soplo, forzando al boton á que se estienda esféricamente, sin ninguno de los inconvenientes de que hemos hablado.

Ahora bien, para que el termómetro sea siempre constante en sus indicaciones, es necesario que el tubo tenga un calibre igual en toda su longitud, á fin de que dilataciones iguales en el mercurio de la bola den iguales crecimientos en la altura de la columna. Cuando se quiere tener un buen termómetro se elige entre un gran número de tubos de vidrio los que mas se acercan á la perfeccion; y para probarlos se introduce en ellos una gota de mercurio que forma un cilindro, cuya longitud se mide. Se hace correr este cilindro por todas partes del tubo, y como su volúmen es siempre el mismo, si el tubo está bien calibrado, debe presentar siempre el cilindro la misma longitud. Como no es fácil hallar tubos en que se verifique esto, es preciso cuando se aspira á la última perfeccion, corregir las pequeñas desigualdades que pueden tener, dividiéndolos en porciones de igual volúmen; lo cual se consigue por medio de una operacion inventada por Mr. Gay-Lussac, y que está esplicada en mi tratado general.

Para introducir el mercurio en la bola del termómetro, es preciso tambien tomar algunas precauciones, porque como es muy estrécho el tubo por donde debe introducirse, se encuentra la dificultad de que hemos hablado anteriormente causada por la resistencia del aire interior: pero se vence por el medio que hemos indicado. Se calienta la bola de vidrio, y el aire que contiene se sale por la dilatacion, entonces se aprovecha este instante para sumergir

la parte abierta del tubo en el mercurio que se quiere introducir en él, y cuando se enfria la bola, le hace subir la presion del aire esterior. Es conveniente tambien calentar mucho el tubo antes de introducir el mercurio, á fin de hacer salir el agua que ha podido introducirse al formar la bola, si se ha hecho con la boca, y para arrojar en cualquier caso la capita de aire y humedad que se adhiere siempre al vidrio en el estado ordinario de la atmósfera. Pero al hacer esta operacion es menester empezar calentando el tubo solo y no la bola; cuando está ya muy caliente se endereza, y calentando la bola súbitamente el aire que contiene se dilata con rapidez, y arrastra delante de sí todas las impurezas que pueda contener el tubo, y que hubieran contrariado el movimiento del mercurio á lo largo de sus paredes.

Algunas veces sucede que no se puede hacer entrar en una sola todo el mercurio necesario para llenar la bola y una parte del tubo. En este caso, se vuelve á empezar la operacion calentando la bola y el mercurio que contiene; cuando está bien caliente se introduce el orificio de tubo en el mercurio, y repitiendo esta maniobra un corto número de veces, se consigue hacer entrar en el instrumento todo el mercurio que se quiera.

¿Pero qué cantidad será necesario introducir en él? Esto depende del uso á que se quiera destinar el termómetro. Si se quiere que pueda servir desde la temperatura del agua hirviendo, hasta los mayores frios que pueden esperimentarse en nuestros climas, es necesario que haya entre la bola y la longitud del tubo ciertas proporciones que la esperiencia enseña á reconocer fácilmente. Si se pone demasiado mercurio, ó si el tubo no tiene la longitud necesaria, sucederá que á la temperatura del agua hirviendo el mercurio llenará todo el termómetro y se verterá por el orificio si está abierto, ó si está cerrado le romperá. Si por el contrario no se ha puesto bastante mercurio, sucederá que en los mayores frios

entrará todo en la bola, y no se podrán observar sus contracciones. La primera vez que se trata de hacer un termómetro solo se puede reconocer por la esperiencia, poniendo alternativamente el instrumento en agua hirviendo y en hielo la cantidad de mercurio que necesita; pero conociendo las leyes de la dilatacion del mercurio, el cálculo da medios directos y seguros para evitar estos inconvenientes, como puede verse en el tratado general. Aqui habremos de limitarnos á suponer que se ha conseguido por medio de ensayos, segun acabamos de decir.

Pero aun no está todo hecho. Cuando el mercurio está ya introducido en el tubo y en la bola, es preciso hacer salir todos los globulitos de aire que han podido mezclarse con él, porque sus dilataciones diferentes de las del mercurio, y su compresibilidad, alterarian la regularidad de los movimientos observados. El único medio de arrojarlos completamente y con toda certeza, es calentar la bola antes de cerrar el tubo hasta hacer hervir el mercurio; pero esta operacion haria salir del tubo una parte del mercurio mismo que se ha hecho entrar, y que es necesario para llenar la bola con un calor inferior. Para evitar este inconveniente es necesario que la parte abierta del tubo esté ensanchada, como manifiesta la fig. 14; de suerte que aunque el mercurio se dilate y salga del tubo por su espansion, no llegue á verterse, sino que se contenga en este reservatorio. Cuando la ebullicion cese y el mercurio se haya contraido, la simple presion del aire esterior bastará para hacer entrar en el tubo el mercurio que haya salido.

Hecha esta operacion, y seguros de que se ha introducido bastante mercurio, respecto á los estremos de calor y frio á que se quiere esponer el termómetro; es preciso cerrarle herméticamente, pues no seria comparable consigo mismo, si pudiera alterarse la cantidad de mercurio. Es necesario tambien al tiempo de cerrarle, tratar de hacer salir todo el

aire que haya sobre la columna de mercurio; no por que pueda oponerse á la dilatacion de este, que se verifica con una fuerza irresistible, sino por temor de que moviéndose el termómetro, se introduzcan algunos globulillos de aire en la columna de mercurio é interrumpan su continuidad, pues entonces seria muy dificil hacerlos salir, sobre todo si el tubo era muy estrecho. He aqui lo que se debe hacer para arrojar enteramente el aire. Se empieza adelgazando á la lámpara el estremo abierto del tubo que se habia ensanchado anteriormente; se calienta la bola del termómetro hasta que el mercurio dilatado por el calor llegue cerca de este estremo, y estando en este estado, se funde de golpe esta estremidad á la luz de una bugía, que se dirije con un soplete; y cerrado el tubo de este modo, no puede volver á entrar el aire, cuando enfriándose el mercurio se contrae de nuevo. Despues se redondea á la lámpara el estremo que acaba de cerrarse, para que no se rompa con facilidad.

Es muy sencillo conocer si un termómetro está hecho con esta precaucion ó no. Basta volverle del reves, es decir, de modo que la bola venga á quedar en la parte mas alta; si está privado de aire y el interior del tubo no es estraordinariamente sutil, el mercurio que no halla nada que le sostenga, cae libremente y llena todo el tubo; pero si el aire no ha sido arrojado totalmente, la columna de mercurio no puede caer hasta el fondo del tubo, porque el aire que se halla en él resiste en virtud de su fuerza elástica.

Cuando se llevan los termómetros en un viaje, sucede muchas veces que la columna de mercurio, se separa en varias partes, y por poco aire que quede en el tubo no se unen estas partes ya fácilmente. Entonces es preciso atar el estremo del tubo á una cuerda bastante larga, y hacerle girar como una honda con la mayor rapidez posible; la fuerza centrífuga obra con mas energia sobre el mercurio que

sobre el aire, por su mayor masa, y regularmente basta para reunir las partes separadas. Mejor seria aun ensanchar un poco la parte alta del tubo al tiempo de construirle; asi cuando hubiese alguna separacion en la columna de mercurio, se calentaria la bola del termómetro hasta que el mercurio subiese á la parte ensanchada, y dejándole enfriar con lentitud volveria á entrar en el tubo en una sola masa continua.

Ya tenemos hecho nuestro termómetro; ahora es preciso aplicarle á las esperiencias.

Supongamos que le ponemos en un vaso lleno de nieve, ó de hielo en el momento de derretirse; el mercurio bajará al momento, y se detendrá en cierto punto fijo en que permanecerá mientras el hielo no acabe de deshelarse. Ahora bien, si el aire esterior está mas caliente que el agua que resulta de esta fusion es claro que la está comunicando el calor continuamente, y pues el mercurio del termómetro no indica esta comunicacion, es evidente que no llega hasta él. Luego se emplea totalmente en fundir la nieve ó el hielo que contiene el agua, y esta desaparicion del calor continúa hasta que la mezcla contenida en el vaso está enteramente líquida. Entonces el calor comunicado al agua pasa al termómetro, y el mercurio empieza á subir por el tubo.

Vemos, pues, que el hielo ó la nieve que se derriten, conducen al mercurio á un estado constante y determinado, y cuantas veces se repita la esperiencia, el mercurio tomará este volúmen, y el estremo de la columna comprendida en el tubo se detendrá en el mismo punto. Marquemos, pues, este punto fijo sobre el tubo de nuestro termómetro, y nos indicará la *temperatura del hielo al derretirse.*

Del mismo modo, si sumergimos nuestro termómetro en otras sustancias mas ó menos calientes; el mercurio que contiene tomará diferentes volúmenes, y veremos la columna comprendida en el tubo detenerse en otros tantos puntos, que serán la señal de estas diferentes temperaturas, cuya idea fijaremos

marcando sobre el tubo el punto que le corresponde.

Las distancias de estos puntos entre sí serán diferentes en cada termómetro que se construya; pues su posicion dependerá de la relacion de la capacidad de la bola con la del tubo, y de la cantidad mayor ó menor de mercurio que se haya introducido. Por consiguiente, si nos limitamos á lo que hemos hecho hasta aqui, el observador no podrá encontrar las mismas temperaturas, si no sirviéndose del mismo termómetro que se las haya indicado la primera vez. Si se le rompe, todas sus esperiencias son perdidas, y ademas no podrá fijar respecto á todos los otros observadores los términos de que quiera hablar. Para evitar estos inconvenientes, se busca por las mismas esperiencias otro punto de temperatura constante, distinto del del hielo al derretirse, se mira el intervalo que separa estos dos términos, como una unidad comun á los observadores de todos los paises, y se la divide en cierto número de partes ó grados iguales; y entonces el valor de estos grados viene á ser, segun demuestra el cálculo, del todo independiente de las dimensiones del termómetro. El segundo punto fijo, generalmente adoptado, es la temperatura del agua destilada hirviendo.

En efecto, cuando se mete el termómetro en un vaso lleno de agua hirviendo, el mercurio sube con rapidez hasta cierto término, y se fija en él. Por mas calor que se quiera añadir despues al vaso, ó por vivo que sea el fuego á que se le ponga, el termómetro no varía mientras no se haya evaporado toda el agua; aqui el calor introducido en ella se emplea en evaporarla, asi como en la primera esperiencia sobre el hielo todo se empleaba en fundir este. Este fenómeno se observa generalmente en la teoría del calor; los términos de fusion y de evaporacion de los cuerpos, son fijos respecto á cada uno de ellos, aunque diferentes con relacion á las demas sustancias. El termómetro lo prueba por su inmovilidad cuando se le sumerge en estos cuerpos al tiempo que mudan asi de estado.

Conviniendo, pues, en elegir por segundo punto fijo el calor del agua hirviendo, marcaremos este punto sobre el tubo. Desde él hasta el punto del hielo hay en cada termómetro cierta distancia; dividámosla en un número cualquiera de partes iguales, por ejemplo, en cien partes que llamaremos grados; y marquémoslos sobre el tubo, escribiendo o al lado del punto del hielo, y 100.° al lado del punto del agua hirviendo. Todos los termómetros construidos con la misma division serán exactamente comparables, es decir, que espuestos á las mismas temperaturas, el estremo de la columna de mercurio se detendrá en el mismo número de grados.

La esperiencia lo manifiesta de este modo, y el cálculo demuestra que asi debe ser. Segun esto, cuando un fisico de Paris escriba que ha observado tal fenómeno á una temperatura de 10 grados centesimales sobre o, otro fisico de Londres ó de San Petersburgo, sabrá precisamente de qué temperatura se trata, y podrá reproducirla en su laboratorio, si quiere repetir las mismas esperiencias. Ordinariamente se prolonga la division bajo el término del hielo derretido, porque el mercurio no se hiela sino mucho mas allá de este término; y se puede prolongar igualmente sobre el término del agua hirviendo, porque el mercurio está muy lejos de hervir en este punto. Por lo mismo es necesario siempre que se espresa una temperatura en grados del termómetro, advertir si estos grados han de contarse sobre el punto del hielo ó debajo de él, punto que siempre se representa por o.

Lo que hace absolutamente comparables todos los termómetros construidos con la misma division y el mismo fluido, es la igualdad absoluta de las dilataciones que se producen en ellos cuando se les espone á la misma temperatura. Pero esta igualdad no se verificaria entre dos termómetros construidos con diferentes fluidos, á menos que las dilataciones de estos, respecto á cada grado, no fuesen proporcionales entre sí.

Como la division centesimal es la mas cómoda para el cálculo, hemos hablado de ella desde luego; sin embargo, no es la única que se usa. Se ha empleado durante mucho tiempo, y aun la emplean un gran número de físicos, una division en 80 partes, que se llama de Reaumur, por suponerse que este hombre célebre fue el primero que la adoptó. Segun lo que hemos demostrado en general respecto á las relaciones de los termómetros, es claro que la diferencia de division no impide que estos puedan componerse entre sí, y con los centesimales. Basta tener presente que 80.º de Reaumur valen 100.º de la escala centesimal, ó lo que es lo mismo, que cada uno de los primeros, vale $\frac{10}{8}$ de los otros; y por consiguiente para reducir un número cualquiera de grados de Reaumur, al número correspondiente de grados centesimales, no habrá mas que multiplicarlos por $\frac{10}{8}$, y recíprocamente se convertirá un número de grados centesimales en grados de Reaumur, multiplicándolos por $\frac{8}{10}$.

Los ingleses se sirven de otra division imaginada y empleada primeramente por Farenheit, físico de Dantzig, que ha contribuido mucho á la perfeccion de los termómetros. En esta division el punto del hielo derretido está señalado con 32, y el del agua hirviendo con 212; el intervalo de estos dos términos, está pues, dividido en 180 partes en lugar de 100 que se emplean en nuestra escala centesimal. Asi, cada grado del termómetro de Farenheit vale $\frac{10}{18}$ á $\frac{5}{9}$ de grado centesimal, y $\frac{8}{18}$ ó $\frac{4}{9}$ de grado de Reaumur, y esto basta para comparar las indicaciones dadas. Por otra parte, es evidente que el principio de las divisiones adoptadas en estos diversos sistemas es del todo indiferente, bastando que sea conocido, y que la division total esté arreglada á los dos términos fijos.

La primera invencion de los termómetros es del fin del siglo 16. Unos la atribuyen á Sanctorius, otros á Galileo, y otros á un aldeano holandes lla-

mado Drebbel. La idea de hacer conocer las variaciones de temperatura por la dilatacion de los cuerpos es sin duda ingeniosa; pero para que fuese útil á la fisica era preciso sacar de ella una medida exacta y comparable, tal como la que resulta de una escala compuesta de un número determinado de grados, y comprendida entre dos temperaturas fijas. Esta modificacion importante, que en realidad es la que constituye el termómetro, me parece que se debe á Newton. Este grande hombre habia ya conocido la necesidad de un intervalo determinado, y desde 1701 habia tomado por temperaturas fijas el hielo derretido y el agua hirviendo, como hacemos aun en el dia. El líquido que empleaba era el aceite de lino; el punto de hielo era el o de su division, y en el del agua hirviendo marcaba 34.º; asi 34.º del termómetro de Newton, valen 100.º de la escala centesimal, de suerte que cada uno de sus grados reducidos á nuestra division vale $\frac{100}{34}$. Newton observó con su termómetro el grado de fusion de un gran número de sustancias, y reconoció que todas estas temperaturas eran constantes; lo cual era un hecho capital para establecer la teoría del calor.

Muchos fisicos han empleado termómetros construidos con otras sustancias, y aun es muy frecuente servirse de los de alcool. Pero como este líquido al aire libre hierve á una temperatura menor que 100.º, no se hace llegar la escala hasta este término, y se gradua por comparacion con algun otro termómetro de mercurio construido anteriormente. Este es un método muy malo, y nada mas fácil que hacer llegar los termómetros de alcool á la temperatura del agua hirviendo y mas allá. Para ello no hay mas que cerrarle con las mismas precauciones que hemos prescrito para los termómetros de mercurio, es decir, de modo que no quede nada de aire en lo interior del tubo, pues entonces por una propiedad que mas adelante haremos conocer, el vapor del alcool que se desprenderá naturalmente por el aumento de

calor, impedirá al alcool aun líquido que entre en ebullicion; y no estando limitado por este fenómeno el aumento de su temperatura continuará dilatándose indefinidamente. Para esto al construir un termómetro de alcool deberá dejarse sobre el líquido un espacio bastante considerable destinado á esta dilatacion. Para sacar de él el aire bastará hacer hervir fuertemente el alcool en la bola y el tubo, y cerrarle con prontitud por el soplete durante la ebullicion; los vapores del alcool desenvueltos en el tubo saldrán con violencia y en pocos instantes habrán hecho salir todo el aire que se hallaba en él. La marcha de este termómetro comparada con la de uno de mercurio, no es uniforme en las temperaturas elevadas; pero se aproxima gradualmente á serlo, á medida que se enfria el alcool, y últimamente lo es con exactitud en las temperaturas muy bajas.

Como las temperaturas del agua hirviendo y del hielo al derretirse son el fundamento de nuestros termómetros, es muy importante examinar con cuidado si son perfectamente constantes, ó si pueden hacerlas variar algunas causas accidentales.

Desde luego, empezando por la temperatura del hielo al derretirse, debemos observar que no debe confundirse con la del agua que empieza á helarse, porque mas adelante veremos que el agua en ciertas circunstancias puede llegar á ser mucho mas fria que el hielo al derretirse, y hacer bajar el termómetro mas allá de o, sin dejar por eso de ser líquida; por consiguiente la temperatura á que se hiela no puede mirarse como fija.

No sucede asi con la temperatura á que se derriten el hielo y la nieve; esta es constantemente la misma, con tal que sea pura el agua de que ha provenido esta nieve ó hielo, porque el agua cargada de sales se hiela á temperaturas mucho mas bajas, y por consiguiente se liquida á diferentes grados. El agua de lluvia helada, ó la nieve sin mezcla de im-

purezas, darán al derretirse el término inferior de nuestra escala termométrica, sin que haya que temer ningun error.

Mucha mas variedad se observa en el término de la ebullicion del agua. Desde luego es menester desechar las aguas cargadas de sales, pues hierven á diferentes temperaturas que el agua pura, comunmente mas altas; pero aun sirviéndose del agua destilada, no se obtiene la ebullicion en el mismo punto del termómetro en distintos dias y lugares. En el capítulo siguiente veremos que estas variaciones que en un mismo sitio pueden llegar hasta 1.º ó 2.º, nacen de la diferencia de presion ejercida por la atmósfera sobre la superficie del agua caliente, como sobre la de todos los otros cuerpos. Para que el agua hierva es necesario que la fuerza elástica de su vapor sea superior á esta presion, y asi el grado de la ebullicion debe variar, variando la presion; pero como la esperiencia nos hace conocer la causa de estas desigualdades, daremos el medio de valuarlas, y de referir todas las observaciones á la presion media que se verifica al nivel del mar, término generalmente adoptado para fijar la temperatura de 100.º Podriamos suplir desde luego, arreglando el término mas elevado de la escala á la fusion de algunos cuerpos; por ejemplo de la aligacion de dos partes de plomo, tres de estaño y cinco de bismuto; porque Newton ha reconocido que esta aligacion se funde precisamente á la temperatura de 100.º; pero es mas sencillo y mas conocido observar la temperatura del agua hirviendo, y hacer segun las circunstancias la correccion necesaria para fijarla á los 100.º

Hay tambien algunas diferencias en el grado de ebullicion, segun la naturaleza de los vasos que se emplean, y segun la de las sustancias que se hallen mezcladas con el agua, aun cuando esta no pueda disolverlas. Este fenómeno ha sido observado por Mr. Gay-Lussac. La misma agua que puesta en un vaso de metal hierve á 100.º de un termómetro dado,

no hierve sino á 101¼ en un vaso de vidrio; y en este mismo vaso vuelve á bajar á los 100.°, si se echa en él un polvo de limaduras de hierro. Segun esto, para señalar á la temperatura de la ebullicion, circunstancias perfectamente fijas, es menester esplicar la naturaleza del vaso en que se ha verificado; y nosotros adoptaremos respecto á esta temperatura la que se obtiene hirviendo el agua en un vaso de metal.

Pero no basta haber determinado temperaturas perfectamente fijas; es menester observarlas bien, y para conseguirlo hay que guardar dos condiciones esenciales, que se han descuidado con demasiada frecuencia.

La primera es comun á la observacion del hielo que se derrite y á la del agua hirviendo. Es necesario que el termómetro tenga enteramente sumergida la parte de su capacidad que contiene mercurio; porque limitándose á sumergir, por ejemplo, la bola únicamente, como se suele hacer, es fácil concebir que el cilindro de mercurio que se halla elevado en el tubo y no se sumerge, no toma la misma temperatura, ni por consiguiente el mismo volúmen que tomaria estando sumergida. Es verdad que se puede remediar este error por el cálculo, conociendo las leyes de la dilatacion del mercurio, la longitud de la parte no sumergida y su temperatura; pero como esta no se conoce nunca bien, y hay que suponerla igual á la del aire que la rodea, lo cual puede no ser enteramente exacto, se ve que siempre será mucho mas ventajoso evitar semejante incertidumbre, sumergiendo enteramente el mercurio en la temperatura á que se le quiere poner.

Otra observacion hay que hacer respecto á la temperatura del agua hirviendo. Si el vaso que se usa tiene algunos decímetros de profundidad, se notará fácilmente por la dilatacion del mercurio que durante la ebullicion, el agua está un poco mas caliente en el fondo que en la superficie. Esto provie-

ne de que el vapor acuoso cuando no puede salir es susceptible de adquirir una temperatura mucho mas elevada que la del agua hirviendo, como se ve haciendo hervir el agua en un aparato cerrado por todas partes, que se llama olla ó digestorio de Papin, por llamarse asi el fisico que la inventó. En este aparato el vapor acuoso y aun el agua misma adquieren una temperatura enorme. Reduzcamos, pues, este resultado á las circunstancias de nuestra esperiencia. Es claro que el vapor acuoso que se forma en el fondo del vaso, estará menos libre que el de la superficie, pues estará oprimido por el peso de la columna de agua que está sobre él; deberá, pues, calentarse mas, antes que pueda escarparse. Tambien deberá comunicar al agua este esceso de calor, y por esta doble causa, la parte del termómetro sumergida en las capas inferiores se calentará mas que la que se halla en la superficie.

Pero por otra parte hemos visto que el termómetro debe estar sumergido enteramente en la temperatura que se le quiere dar; por consiguiente si queremos ponerle á la temperatura de la ebullicion de la superficie, será necesario echarle en ella horizontalmente, lo cual aumenta mucho la dificultad de la observacion.

Felizmente se ha hallado el medio de remediar este inconveniente, segun una observacion muy fácil de hacer, esto es, que la temperatura del agua hirviendo en la superficie es exactamente la misma que la del vapor que sale de ella. Para comprobar este hecho, tomemos un vaso metálico, cuyo cuello sea largo y estrecho, como representa la fig. 15, y pongamos agua en él hasta una altura conocida por ejemplo hasta H H; hagamos hervir el agua colocando el vaso sobre el fuego, y cuando sea completa la ebullicion; metamos en ella un termómetro M B á muy poca profundidad, y observemos el punto M en que se detiene el mercurio. Continuando siempre la ebullicion, supongamos que se ha empleado una

cantidad de agua tal, que el punto M venga justamente junto al orificio G G. Saquemos entonces un poco el termómetro del agua H H, de modo que su bola y su tubo se hallen sumergidos únicamente en el vapor; el termómetro no marcará la mas pequeña diferencia, permaneciendo el mercurio exactamente en el mismo punto que antes. Es, pues, indiferente que la bola esté sumergida en el agua á una profundidad muy pequeña, ó en el vapor, y por consiguiente es la misma la temperatura de esta agua, y del vapor que sale de ella.

Esto nos da un medio muy sencillo de arreglar nuestros termómetros; pero aun puede perfeccionarse. No es necesario que el vapor acuoso salga por el mismo orificio que sirve para introducir el termómetro, pues impediria ver exactamente el punto en que termina la columna de mercurio. Sin embargo, es menester que este vapor no esté encerrado porque adquiriria un grado de calor mayor que el de la ebullicion, y asi es precisio dejarle un libre paso que se escape al aire. Todas estas condiciones se verifican en un vaso que tenga dos aberturas, como el que representa la fig. 16, la una M, tapada con un tapon de corcho *b b*, sirve para introducir los termómetros que se quieren arreglar, y la otra *o o* sirve para dejar salir el vapor. Se hacen subir y bajar los tubos segun se quiera, á traves del corcho *b b*, segun su longitud; y cuando se desea observar la estremidad de la columna de mercurio, para marcar el punto de ebullicion, no se hace mas que sacarlos un momento hasta este punto, que se marca al instante con tinta de china, ó cualquiera otra sustancia. Hecho esto, se vuelve á bajar, y se les retira de nuevo despues de algunos instantes, para repetir la esperiencia, y ver si el estremo de la columna de mercurio permanece en el mismo punto. De este modo se pueden arreglar muchos termómetros á la vez en muy poco tiempo, y con una gran exactitud.

Hemos supuesto que los tubos de los termóme-

tros eran exactamente cilíndricos, ó que se habia suplido á sus pequeñas irregularidades, trazando en ellos division de igual volúmen por el método de Mr. Gay-Lussac. He aqui otro método muy simple respecto á los tubos gruesos. Se sopla á la lámpara una ampolla de vidrio AA, fig. 17, cuya capacidad sea bastante pequeña para servir de unidad de volúmen, y cuyos estremos AA esten adelgazados formando tubos de un diámetro muy pequeño. Sumerjiendo esta ampolla en un baño de mercurio se llena, y si se retira tapando sus dos estremos con los dedos contendrá siempre el mismo volúmen de mercurio, con tal que la temperatura sea constante. Se verterá este volúmen en el tubo ó en los vasos que se quieren graduar, y se señalará en su superficie el punto en que termina el mercurio á cada cantidad que se vierta. Solo es menester tener cuidado de que toda la operacion se haga á una temperatura perfectamente constante para que la ampolla tenga siempre la misma capacidad, y que las cantidades sucesivas de mercurio que se vierten en el tubo ó vaso que se gradúa conserven tambien el mismo volúmen que al principio.

Un aparato de bastante volúmen para poderse hacer de este modo tendria necesariamente menos sensibilidad que un termómetro pequeño, es decir, que por causa de su masa las variaciones de calor obrarán con menos rapidez sobre él; pero seria muy cómodo para determinar la cantidad absoluta de la dilatacion del mercurio cuando pasa del punto del hielo al del agua hirviendo; lo que serviria para conocer de antemano el tamaño que deberia darse á los tubos de los termómetros, conocida la capacidad de la bola correspondiente. Supongamos que se sigue comparativamente la marcha del mercurio en un tubo grueso y en un termómetro centesimal ordinario, esponiendo ambos á una misma temperatura, por ejemplo, sumerjiéndolos en la misma agua, y se verá cuántas partes se dilata el mercurio por

cada grado. Es verdad que este resultado no seria enteramente exacto, porque el vidrio se dilata al mismo tiempo que el mercurio que contiene, y por consiguiente la dilatacion observada en este líquido no será realmente sino el esceso de su dilatacion verdadera sobre la del vidrio; pero justamente este esceso de dilatacion es el que necesitamos conocer para preveer con seguridad la longitud que debemos dar á los tubos de nuestros termómetros, segun la capacidad de sus bolas y los intervalos de temperatura en que se les quiera hacer servir.

Obrando de este modo se halla que la dilatacion aparente del mercurio desde el punto del hielo que se derrite hasta el del agua hirviendo es exactamente $\frac{1}{63}$ del volúmen que ocupa en la primera de estas temperaturas; y ademas se halla que la marcha de esta dilatacion es constante respecto á cada grado del termómetro comprendido en este intervalo, es decir, que es $\frac{1}{6300}$ por cada grado de la division en 100 partes. Esta es una consecuencia de estar los dos termómetros construidos con el mismo líquido.

Pero esta es, como hemos dicho, la dilatacion aparente; porque midiendo directamente la dilatacion del vidrio, y contando con ella al hacer la esperiencia, resulta que la verdadera dilatacion del mercurio entre el hielo y el agua hirviendo es de $\frac{100}{5412}$ de su volúmen á 0^{0}; lo cual da $\frac{1}{5412}$ por cada grado del termómetro centesimal. Es, pues, mayor que la dilatacion aparente; y en efecto debe ser asi, pues esta no es otra cosa que el esceso de la dilatacion del mercurio sobre la del vidrio. Es de mucho interés advertir que las indicaciones del termómetro son enteramente independientes de la cantidad absoluta de esta dilatacion; pues aunque fuese, por ejemplo, doble ó triple de la que acabamos de decir, con tal que siguiese la misma proporcion en todas las temperaturas, los grados indicados por el termómetro serian tambien iguales en las mismas circunstancias; solamente que teniendo las mismas

dimensiones iniciales á la temperatura del hielo, las dilataciones, hasta la del agua hirviendo, serian dobles ó triples; de donde resultaria que los grados que son la centésima parte de este intervalo serian tambien dos ó tres veces mayores. Esta observacion prueba que las diferentes especies de vidrio que pueden usarse para fabricar los termómetros no impiden de modo alguno que sean comparables; pues mas adelante probaremos por la esperiencia, que en la estension de la escala termométrica, esto es, desde 0^{o} á 100^{o} las dilataciones del mercurio son exactamente proporcionales á las del vidrio y demas cuerpos sólidos que no se funden sino á temperaturas muy elevadas; de donde se sigue, que la diferente dilatabilidad de las varias especies de vidrio no hace mas que alterar proporcionalmente el tamaño absoluto del intervalo fundamental y de todos los grados; pero estos corresponden exactamente á las mismas temperaturas, aunque los termómetros sean diferentes en longitud. Lo mismo sucederia si se construyesen con líquidos diferentes, cuyas dilataciones, aunque muy desiguales, fuesen constantemente proporcionales entre sí en todo el intervalo en que se quisiesen emplear.

Los termómetros construidos con líquidos, y cuyo tubo está bien privado de aire, pueden emplearse, como hemos dicho, para observar temperaturas mucho mas elevadas que el término en que hierve al aire la sustancia que contienen, y con esta precaucion su uso se estiende mucho mas allá de lo que comunmente se cree. Sin embargo, respecto á temperaturas muy elevadas, como la del hierro enrojecido y las de fusion de la mayor parte de los metales, es preciso recurrir á otros métodos que veremos al estudiar, especialmente las propiedades y leyes del calórico.

Por todo lo que acabamos de decir en este capítulo se ve que un gran número de físicos distinguidos han trabajado hace mucho tiempo para dar al

termómetro toda la exactitud y sensibilidad de que es susceptible. Tantas investigaciones empleadas para fabricar un pequeño instrumento de vidrio podrian parecer minuciosas si no se considerase en ellas mas que un objeto de pura curiosidad; pero son de la mayor importancia si se atiende á las consecuencias que se derivan de ellas, y á los conocimientos que nos proporcionan acerca de los fenómenos de la naturaleza. Las aplicaciones del termómetro en la física, química y demas ciencias naturales son innumerables. Sus indicaciones son la base de toda la teoría del calor; es el regulador de todas las operaciones químicas; el astrónomo le consulta á cada paso en sus observaciones para calcular las alteraciones que sufren los rayos luminosos emanados de los astros al atravesar la atmósfera, que los hace encorvar mas ó menos segun su temperatura. Al termómetro debemos todos nuestros conocimientos sobre el calor animal producido y sustentado por la respiracion. El es quien fija en cada sitio de la tierra la temperatura media del clima; el que nos manifiesta el calor terrestre constante en cada parage, pero disminuyendo de intensidad desde el ecuador á los polos constantemente helados; el que nos enseña que el calor disminuye á medida que se considera un punto mas elevado de la atmósfera ó sumergido en los abismos del mar; de donde resultan las variaciones progresivas de la vejetacion á diferentes alturas. Cuando se ven tantos resultados obtenidos por medio de un poco de mercurio encerrado en un tubo de vidrio, y se piensa en que un pedacito de hierro suspendido en un eje ha hecho descubrir el Nuevo-Mundo, se conoce que nada de cuanto puede estender y perfeccionar los sentidos del hombre es de poca consideracion; motivo que me servirá á mí tambien de escusa, respecto á la multiplicidad de pormenores en que acabo de entrar.

CAPITULO IV.

De las destrucciones y reproducciones de calor que se observan mientras los cuerpos mudan de estado.

El termómetro nos ha hecho conocer que la temperatura de cada cuerpo permanece constante mientras dicho cuerpo se funde ó se evapora. Si se trata de calentar mas en este estado, todo el calor producido se destruye, sin ocasionar mas efecto que el de continuar fundiendo el cuerpo ó evaporándole. Esta destruccion de calor es un hecho tan notable, que es preciso que insistamos particularmente en él.

Sus efectos pueden observarse en una infinidad de circunstancias, independientemente de la inmobilidad del termómetro. Tómese una cantidad cualquiera de agua, por ejemplo, de 10 kilógramos de peso, y caliéntese hasta la temperatura de 75° centesimales. Mézclense entonces con ella otros 10 kilógramos de agua líquida á la temperatura del hielo formada por la fusion de este, y se tendrán 20 kilógramos de agua á una temperatura como de 37,5°, es decir, casi exactamente intermedia entre las de las masas iguales que se han mezclado. Pero si en vez de estos 10 kilógramos de agua fria aun líquida se emplean 10 kilógramos de nieve é hielo, que estarán á la misma temperatura que ella, sin mas diferencia que la de hallarse en un estado sólido, la temperatura de la mezcla, despues de la fusion de esta nieve ó hielo, será precisamente de 0.° Asi, el agua líquida á 0 la enfria mucho menos que el mismo peso de nieve ó hielo á igual temperatura que se calienta en ella y se funde al mismo tiempo.

Esta destruccion de calor parece una condicion necesaria de la liquefaccion, porque se observa igualmente en cualquera temperatura, siempre que la liquefaccion se verifica. He aqui ejemplos de este fe-

nómeno. Hay ácidos tan ávidos de agua que llegan á disolver la nieve ó el hielo para combinarla con su propia sustancia; hay tambien sales que cuando se las mezcla con la nieve ó el hielo quebrantado se combinan igualmente con ellas, y forman un todo líquido; y para que estas combinaciones se verifiquen no es necesario que la temperatura de estas sustancias sea mas elevada que la de la nieve ó hielo, pues ejercen su poder disolvente á la misma temperatura, y aun mucho mas baja. Entonces la destruccion de calor que debe verificarse para liquidar la nieve ó el hielo se verifica igualmente, pero á espensas de la temperatura de la mezcla que baja considerablemente. Esto sucede cuando se mezclan, por ejemplo, dos pesos iguales de nieve y de muriate de sosa sólido: si estas dos sustancias se hallan á la temperatura del hielo al derretirse, y la mezcla se hace de un modo rápido, su temperatura llega hasta 18° bajo 0. Si se hace enfriar separadamente á esta misma temperatura dos partes de muriate de cal y una de nieve y se mezclan en seguida, la temperatura de la mezcla llegará á 54° bajo 0; y en fin, si se hacen enfriar á esta última temperatura cuatro partes de nieve y cinco de ácido sulfúrico dilatado en agua y se mezclan en seguida, la temperatura bajará hasta 68.° Todos estos fenómenos nos prueban que la destruccion del calor indicada por el termómetro en la fusion del hielo y demas cuerpos sólidos que se funden á temperaturas mas elevadas no depende de la elevacion de estas temperaturas. Es un fenómeno general unido al acto de la liquefaccion; y la prueba evidente de que este acto es la verdadera causa del descenso de temperatura es que si las sustancias que se mezclan se enfrian anteriormente mas abajo de la temperatura que puede sufrir el líquido que resulta de ellas sin helarse la mezcla no produce ningun enfriamiento.

Veamos ahora otro fenómeno, que es, por decirlo así, inverso de los que acabamos de examinar.

Todo el calor que los cuerpos habian destruido al fundirse ó evaporarse reproduce y vuelve á aparecer cuando los cuerpos cambian de estado al contrario, es decir, cuando los vapores se liquidan ó los líquidos se convierten en sólidos. Si se mezclan 10 kilógramos de agua hirviendo con 10 kilógramos de agua á 0°, se tendrán 20 kilógramos de agua á una temperatura exacta ó casi exactamente intermedia, es decir, como de 50.° Pero si en lugar de agua hirviendo se emplean 10 kilógramos de vapor á la misma temperatura, el calor que resulte de la mezcla será mucho mas considerable, y suficiente para hacer hervir no solo 10 sino 57 kilógramos de agua á 0.° Asi, este vapor al condensarse y volverse líquido reproduce y restituye el calor que habia destruido al formarse.

Mas adelante trataremos de medir estos efectos con exactitud; pero antes es preciso que nos formemos muchos medios de observacion que nos faltan, y que adquiramos mayores conocimientos sobre la constitucion de los cuerpos; era preciso, sin embargo, hacer notar desde ahora estos fenómenos para poder referir á ellos otros muchos hechos análogos que se nos presentarán en el curso de las esperiencias, y cuya observacion directa nos hubiera sido imposible sin este preliminar.

Estas desapariciones y apariciones del calor han servido de base al sistema de los químicos, que miran el calórico como una materia. De ellas han deducido que el calórico puede existir en dos estados diferentes, á saber, libre y combinado. Combinado con las sustancias de los cuerpos desaparece respecto á nuestros sentidos, y no obra ya sobre el termómetro; entonces le llaman *calor latente*, esto es, oculto. Separado de esta combinacion le dan el nombre de *calor libre*; entonces obra sobre el termómetro y sobre nuestros órganos, dilata los cuerpos, los funde, los evapora, y produce todos los fenómenos sensibles. Se ve, pues, que este sistema está perfecta-

mente acomodado á las circunstancias que se observan cuando los cuerpos mudan de estado. Está, por decirlo asi, amoldado sobre ellos; ¿pero satisface igualmente á todos los demas hechos que no le han servido de base, como por ejemplo, la propagacion del calor en el aire y por medio de los cuerpos? Estas cuestiones tenemos que examinar cuando estudiemos, especialmente las propiedades del calórico.

Por el contrario, los físicos, que miran el calor como efecto de un movimiento de vibracion escitado en las partículas de los cuerpos, asimilan los efectos que acabamos de examinar con la ley conocida en mecánica bajo el nombre de conservacion de las fuerzas vivas. Llámase asi en un sistema de cuerpos la suma de los productos de sus masas por los cuadrados de sus velocidades; y se demuestra que esta suma es constante cuando el movimiento del sistema nace solo de la atraccion recíproca de los cuerpos que le componen. Asi, mirando el calor como un efecto producido por la fuerza viva de los cuerpos que resulta del movimiento de vibracion de sus partes, se ve que su cantidad total debe permanecer constante en los diferentes estados en que pueden encontrarse, y se concibe por qué despues de aumentarse en el cuerpo que se evapora á espensas del que le calienta disminuye de nuevo y se restituye al otro cuando el cuerpo vuelve al estado de líquido. Pero tambien esta hipótesis se halla establecida sobre los fenómenos que se observan en la mudanza de estado de los cuerpos, y por consiguiente será necesario sujetarla á otras pruebas independientes de estos principios para poder apreciar su probabilidad por la estension de sus aplicaciones.

Los partidarios de la materialidad del calórico se han ocupado mucho en averiguar si los grados del termometro eran ó no proporcionales á las cantidades de calorico introducidas en los cuerpos. Pero

reduciendo, como hemos hecho, la idea de temperatura á su verdadera significacion, que no espresa mas que el estado, aparente y sensible á que son conducidos los cuerpos, por la accion que el calórico ejerce sobre ellos, se ve que el termómetro no necesita para indicar este estado, seguir una marcha proporcional á la intensidad de accion que el calórico ejerce sobre él, sino que basta que sus indicaciones sean siempre semejantes y constantes, es decir, que cuando la accion sensible del calórico sea la misma, sea tambien igual el grado de temperatura indicado por el termómetro. Esta constancia se verifica perfectamente, siempre que se repite la esperiencia esponiendo el termómetro en circunstancias semejantes, por ejemplo, cuando se le sumerge en un cuerpo que se ha calentado hasta el grado de fusion. Para que esta observacion sea exacta y comparable á sí misma, aunque se haga con diferentes termómetros, solo se necesita que su influencia propia sobre la temperatura del cuerpo en que estan sumergidos, pueda mirarse como nula, á fin de que su introduccion en este cuerpo no la altere sensiblemente. He aqui á lo que se reduce la indicacion del termómetro, querer proporcionar su marcha á la cantidad ó intensidad del calórico que obra sobre los cuerpos, es querer unir una hipótesis á un hecho cierto, y complicar un instrumento sencillo, con una aplicacion que no es propia de él. Respecto á nosotros, fieles á nuestras definiciones, continuaremos mirando el calórico como un principio, cuya naturaleza ignoramos; el calor será para nosotros el efecto de este principio sobre nuestros órganos, y sobre los demas cuerpos, y la temperatura será la energia mayor ó menor de estos efectos. El termómetro, fijando las temperaturas por sus indicaciones, manifiesta que es mayor ó menor la accion sensible del calórico, y nos indica diferencias y no relaciones.

CAPITULO V.

De la presion atmosférica y del barómetro.

Antes de que la fisica hubiese llegado á ser una ciencia de esperiencia, es decir, hasta el tiempo de Galileo, se creia que ninguna parte del espacio podia hallarse vacía de materia, y se espresaba esta imposibilidad, diciendo que la naturaleza tenia horror al vacío. Asi, cuando se veia subir el agua en las bombas, al momento en que se elevaba el embolo, se decia que este al elevarse, procuraba formar un vacío en los tubos de la bomba, pero que la naturaleza que tenia horror á este vacío, se apresuraba á hacer subir el agua para llenarle. Nadie se acordaba de preguntar, cómo la naturaleza, que no es otra cosa que el conjunto de los fenómenos, podia personificarse de este modo, y transformarse en un ser susceptible de pasiones. A esta época no se habia inventado aun la duda. Un dia, queriendo ciertos fontaneros de Florencia construir una bomba muy larga, con el objeto de subir el agua á una altura mayor que la ordinaria, encontraron que subia por el cuerpo de bomba hasta treinta y dos pies con corta diferencia; pero que absolutamente no *queria* subir mas arriba, por mas que se hiciese subir el embolo. Admirados de este accidente, fueron á consultar á Galileo, que les dijo, burlándose de ellos, que á lo que parecia, la naturaleza no tenia horror al vacío sino hasta la altura de 32 pies. Ya este filósofo habia entrevisto que este fenómeno y otros semejantes eran simples resultados mecánicos, producidos por la gravedad del aire; probablemente no habria limitado á tan poco sus ideas sobre un objeto tan nuevo; pero quiso mejor dar esta escusa á los fontaneros, que esponer su modo de pensar, y al fin murió sin haberle hecho conocer. Torricelli, su discipulo, fue quien demostro completa-

mente este descubrimiento, por una esperiencia sumamente ingeniosa. Llenó de mercurio un tubo de vidrio de tres pies de largo, cerrado por uno de sus estremos, despues tapando el otro con el dedo, volvió el tubo y le sumergió por esta punta en un vaso abierto lleno igualmente de mercurio, y retirando el dedo dejó de sostener la columna contenida en el tubo Al momento se la vió bajar, dejando vacía la parte alta del tubo; pero al instante se detuvo, y despues de algunas oscilaciones quedó en equilibrio á 28 pulgadas de altura poco mas ó menos, es decir, á unas 0, 76 de metro.

Segun esto, era evidente que si en las bombas la naturaleza no tenia horror al vacío, sino hasta 32 pies, no le tenia en los tubos llenos de mercurio, mas que hasta la altura de 28 pulgadas. Esta conclusion era tan ridícula, que fue preciso dudar del principio, y renunciar á este grande axioma: *non datur vacuum, in rerum natura.*

La causa real de estos fenómenos es muy sencilla y fácil de descubrir: pero es preciso deducirla de las propiedades mecánicas del aire, es decir, que despues de haber establecido las propiedades de este fluido, tales como nos las hace conocer la esperiencia, es necesario demostrar que los fenómenos de que acabamos de hablar, son consecuencias suyas inevitables. Tal es la marcha de la buena física.

El fluido raro y transparente que nos rodea por todas partes, y que llamamos aire, es un cuerpo que goza como todos los demas, de las propiedades generales de la materia: es resistente y pesado. Su resistencia se hace conocer cuando le apretamos en un espacio cerrado, por ejemplo, en una vejiga. Es tan cierto que es un cuerpo, que su choque mecánico pone en movimiento una infinidad de máquinas, empuja las alas de los molinos de viento, é hinche las velas de los buques. Tambien se hace conocer su peso; porque estrayendo del interior de un globo de vidrio todo el aire que contiene (como se hace por

un método que pronto daremos á conocer), este globo cerrado y pesado, se halla que es mas ligero que anteriormente. Segun esto, cuando la superficie de un líquido como el agua ó el mercurio, se halla espuesta libremente al aire, está en realidad oprimida por todo el peso de la columna de aire que hay sobre ella. Como esta presion es igual sobre todos los puntos de la superficie liquida, no produce en ella ningun movimiento; pero supongamos que despues de introducir en el liquido la parte inferior de un tubo de bomba, se eleva el embolo, ó para indicar un ejemplo todavía mas simple, supongamos que sumergiendo en él el estremo inferior de una paja, se aspira por el otro estremo el aire que contiene; en uno y otro caso, las moléculas de la superficie líquida que se hallan en lo interior del tubo, estan evidentemente descargadas de una parte del peso del aire que antes obraba sobre ellas, mientras que las partes que estan fuera del tubo, se hallan oprimidas del mismo modo que antes; entonces el líquido debe necesariamente por el lado en que es menor la presion, subir por el tubo, hasta que el peso de la columna líquida elevada, junto á la elasticidad del aire que haya quedado dentro, forme una presion igual á la del aire esterior. Cuando esta igualdad se verifique, todos los puntos de la superficie del líquido se hallan igualmente comprimidos; pues no hay razon alguna para que se pongan en movimiento á un lado ni á otro, y por consiguiente debe subsistir el equilibrio.

Se ve, pues, que si fuese posible quitar todo el aire contenido en el interior de un tubo, el líquido subiria hasta que su peso solo equilibrase el de la atmósfera. Este es el caso de las bombas, y el de la esperiencia de Torricelli.

Aunque esta conclusion es de todo punto evidente, tenemos un medio de comprobarla y no debe despreciarse, pues solo asi, pasando de los hechos á sus consecuencias, y de estas á nuevos hechos, se

adelanta con seguridad en el estudio de la naturaleza. Si la ascension del agua y la del mercurio son efectivamente producidas por la presion del aire, es necesario que el peso de la columna de agua de 32 pies á que se eleva en las bombas, sea igual al de la columna de mercurio de 28 pulgadas que se sostiene en el tubo de Torricelli, suponiendo iguales las bases de estas dos columnas. En efecto, pesando en las balanzas muy exactas volúmenes iguales de agua y de mercurio á temperaturas iguales, por ejemplo en esferas de vidrio, llenas sucesivamente de estos dos líquidos, se halla que el mercurio pesa, con corta diferencia, trece veces y media mas que el agua; asi segun nuestro razonamiento, la columna de agua elevada en la bomba debe ser trece veces y media mayor que la de mercurio elevada en el tubo de Torricelli. Ahora bien, esta era de 32 pies, que hacen 384 pulgadas; si este número se divide por $13\frac{1}{2}$, resulta por cuociente 28 pulgadas, que es realmente la altura de la columna de mercurio en la esperiencia de Torricelli; y la conformidad es tan exacta, que se hubiera podido determinar esta altura por el cálculo con la misma exactitud que se determina por la esperiencia.

Esta posibilidad de predecir los fenómenos es el carácter de la seguridad. Admitamos, pues, que el aire es pesado, y que la presion de la atmósfera es la verdadera causa de los fenómenos que acabamos de examinar; pero ademas tratemos de sujetar á nuevas pruebas esta conclusion: examinemos los demas efectos que puede producir esta presion, y veamos si los confirma la esperiencia.

La presion del aire como la de todos los fluidos pesados, no debe ejercerse solo de arriba á bajo, sino que debe comprimir en todos sentidos las superficies de los cuerpos á que toca. De aqui resulta que cuando un cuerpo está espuesto al aire, cada punto de su superficie se halla oprimido por este como lo estaria por el peso de una columna de agua de 32

pies de altura, ó por una de mercurio de 28 pulgadas. Se ha calculado á cuanto puede ascender la totalidad de esta presion sobre la superficie del cuerpo de un hombre regular, y se ha hallado que pasa de 33000 libras, ó 16000 kilógramos con corta diferencia.

Tal vez parecerá increible este resultado creyendo que una presion tan considerable deberia estorbar mucho, y aun impedir enteramente nuestros movimientos; pero en las ciencias és preciso raciocinar antes de juzgar, y no desechar un resultado como absurdo solamente porque nos admira. He aqui otro ejemplo aun mas admirable. Hay en el mar pescados que viven habitualmente á grandísima profundidad: los pescadores los cogen á veces á dos ó tres mil pies bajo la superficie del agua; estos pescados, pues, se hallan toda su vida cargados con el peso de una columna de agua de dos ó tres mil pies de altura, es decir 78 ú 80 veces mayor que el peso de la atmósfera, y no solo viven sin ser aplastados por este enorme peso, sino que se mueven en todos sentidos con la mayor agilidad, lo cual es mucho mas estraordinario que el vernos sufrir la presion del aire. Pero toda la parte maravillosa desaparece, si se considera que los peces de que acabamos de hablar estan penetrados y llenos interiormente de líquidos que resisten á la presion del agua esterior en virtud de su impenetrabilidad; de suerte que las membranas del animal no sufren nada absolutamente. En cuanto á la facilidad de los movimientos, nace de que el pescado se halla igualmente comprimido por todas partes, de suerte que la presion se contrabalancéa por sí misma, y asi le es tan fácil mudar de sitio, como si nadase en la superficie del agua. De la misma manera, respecto á nosotros que soportamos el peso de la atmosfera, el interior de nuestro cuerpo, y aun nuestros mismos huesos estan llenos ó de líquidos incompresibles capaces de soportar todas las presiones, ó de aire tan elástico como el esterior, y

que contrabalancea su peso, y por eso no sufrimos ninguna incomodidad, ni esperimentamos dificultad alguna para movernos, porque la presion se equilibra por todas partes, como la del agua sobre el cuerpo de los pescados. Solo podriamos ser aplastados por el aire esterior si se estragese de nosotros el interior que le equilibra, y por el contrario sufririamos mucho si se nos quitase de repente esta presion colocándonos en el vacío; porque entonces no habiendo nada que resistiese al aire interior, se dilataria, nos inflaria y nos haria morir infaliblemente. Esto es lo que sucede á muchos pescados cuando se les saca de la profundidad del mar, aunque no sea mas que de veinte ó treinta metros. La mayor parte de ellos tienen en el interior de su cuerpo una vejiga llena de aire, no atmosférico, sino de una especie particular de gas producido y secretado por un resultado de su organizacion especial. Mientras estos animales se hallan á la profundidad en que viven ordinariamente, el aire contenido en su vejiga tiene el grado de compresion y elasticidad necesario para soportar el peso del agua que obra sobre ellos; pero si de repente se les saca fuera del agua, como no tienen conductos bastante anchos para arrojar prontamente la parte superflua de este aire, y aun algunos no los tienen absolutamente, sucede que su vejiga se infla, se rompe, y el aire que contenia, ocupando un volúmen ochenta ó cien veces mayor, llena su cuerpo, vuelve su estómago hácia fuera, le obliga á salir por la boca y los hace perecer. Entonces se les puede dejar sobre el agua, pues su cuerpo flota sobre la superficie sostenido por este estómago lleno de aire como por un balon.

En general el conocimiento de la presion del aire es la llave de una multitud de resultados físicos que se repiten sin cesar á nuestra vista; y el uso de esta presion como motor, se emplea en una multitud de casos. Uno de los mas simples y útiles á los físicos, es el de producir corrientes constantes

de aire ó de gas en los instrumentos llamados *gasómetros.*

El aparato de Torricelli ha recibido de los físicos el nombre de *barómetro*, que significa medida de la gravedad, porque en efecto, mide la presion ejercida por la atmósfera en el sitio en que se halla colocado. Su uso es indispensable en una infinidad de esperiencias, pues siendo la presion ejercida por la atmósfera, una fuerza competente que se combina casi siempre con las demas fuerzas de que podemos disponer, se ve que es preciso contar con ella si se quieren obtener resultados exactos. Debemos, pues, antes de pasar mas adelante esplicar menudamente todas las precauciones que deben tomarse para hacer el barómetro tan perfecto y exacto como puede desearse.

La primera condicion que hay que observar para conseguirlo, es escluir exactamente el aire del interior del tubo de vidrio en que ha de quedar suspenso el mercurio, cosa que pide algunas precauciones. Para esponer el hecho con la mayor sencillez, nos hemos contentado con suponer que se llenaba de mercurio el tubo, y que se volvia sobre un vaso que le contuviese tambien, poniendo el dedo sobre el estremo abierto para impedir que se cayese; pero si se hiciese la operacion de este modo, solo se tendria un barómetro muy imperfecto. Desde luego, el mercurio como todos los líquidos absorve aire, se penetra de él y le combina con su propia sustancia; este aire se halla contenido en él por dos causas, la atraccion del mercurio, y la presion atmosférica que se opone á la espansion de su elasticidad; pero luego que se verifica el vacío barométrico, como no existe la presion de la atmósfera, hace los mayores esfuerzos para separarse de él, y en efecto lo consigue, atravesando el mercurio en globulillos que vienen á reventar en su superficie. Entonces esparciéndose por la parte interior del tubo barométrico, se opone á la presion ejercida por el aire esterior, la

contrabalancea en parte, en virtud de su propia elasticidad, y por consiguiente hace bajar la columna de mercurio mas de lo que bajaria si el interior del tubo estuviese perfectamente vacío; de suerte que la altura de esta columna no espresa ya la verdadera presion de la atmósfera, sino solo el esceso de la presion de fuera sobre la de dentro. Se ve, pues, que para conocer la presion real y efectiva, es necesario empezar separando del mercurio todo el aire que está unido con sus partículas, lo cual se consigue haciendo hervir el mercurio, pues el calor da un aumento de elasticidad al aire combinado con el líquido, le fuerza á separarse de él, y no estando ya retenido por la fuerza de afinidad se escapa en globulillos pequeños; se cierra con cuidado el vaso que contiene el mercurio, se le deja enfriar y se guarda para cuando sea necesario.

Pero la esperiencia nos hace ver que las moléculas de agua y de aire se adhieren fuertemente á la superficie del vidrio, y como siempre hay esparcida por la atmósfera alguna cantidad de agua en estado de vapor, suele suceder que una capa muy delgada de aire y agua, se adhiere tenazmente á las paredes interiores de los tubos de vidrio. Si se emplea un tubo semejante sin ninguna preparacion para hacer un barómetro, cuando se haya llenado de mercurio, vuelto y formado el vacío, sucederá con esta capita lo mismo que anteriormente con las partículas combinadas con el mercurio, es decir, que una parte de ella se reducirá á vapor elástico en lo interior del tubo, y contrabalanceará en parte la presion esterior de la atmósfera: de suerte que tambien por la accion de esta segunda causa se mantendrá demasiado baja la columna del barómetro. El único medio que hay para arrojar esta capa de humedad es calentar el tubo tan fuertemente que se la obligue á separarse: y aun será preciso hacerlo despues de haber introducido el mercurio en el tubo, pues de otro modo el agua y el aire volverian á entrar en él mien-

tras se llenaba, y se adheririan de nuevo á sus paredes. El medio mejor y mas seguro de evitar todas estas causas de error, es introducir poco á poco el mercurio en el tubo, y calentarle cada vez lo bastante para hacerle hervir.

Es verdad que esta operacion parece al principio muy dificil, porque siendo el vidrio una sustancia tan frágil, y que se rompe tan fácilmente por el efecto súbito de calor, debe temerse que los tubos se rompan en esta tentativa, y que siempre sucedan desgracias; sin embargo, es sumamente fácil haciéndola con precaucion, y sobre todo arreglándose á las observaciones que hemos hecho sobre la dilatacion. Cuando se rompe un cuerpo que se calienta, la fraccion no es solo ocasionada por efecto del calor, porque esta accion deberia fundir el cuerpo y no romperle. La rotura proviene de la desigualdad de la accion del calor, que obrando de diferente modo sobre sus diversas partes las dilata de una manera desigual. Si la dilatacion es lenta y gradual, cediendo el cuerpo poco á poco, sufre el efecto del fuego sin romperse; pero cuando dos partes que se tocan se hallan dilatadas de pronto en proporciones muy diferentes, no pueden obedecer á un mismo tiempo á fuerzas tan desiguales; y si su accion es bastante enérgica para vencer la fuerza de cohesion que las mantenia unidas unas á otras, se separan y el cuerpo se rompe; asi que para evitar toda rotura no hay mas que calentarle gradualmente como lo confirma la esperiencia. Obrando con precaucion y de una manera conveniente, se puede hacer fácilmente cocer el agua y el mercurio en vasijas de vidrio, con tanta mas facilidad, cuanto mas delgadas son estas, porque entonces el calor se propaga con mas libertad, y penetra mejor toda su masa.

Esto supuesto, he aqui el modo de proceder. Se dispone un hornillo de tierra sesgado por un lado, se pone en el carbon encendido, pero de modo que no haga llama, porque esta romperia infaliblemente

el tubo si le tocase; se pone el tubo vacío sobre el fuego, bastante lejos al principio, y se acerca gradualmente hasta que haya adquirido un fuerte calor, haciéndole girar entre los dedos y moviéndole sobre el fuego á lo largo para que se caliente igualmente por todas partes. El objeto de esta primera operacion es el de hacer salir las gotitas de agua que puedan hallarse en el tubo, pues si se dejase para despues de haber puesto el mercurio, el vapor que produjesen le arrojaria fuera, ó por lo menos produciria sacudimientos que podrian hacer romper el tubo. Estando ya este bien seco, se pone en él mercurio ya cocido, no tanto que le llene enteramente, sino solo para ocupar la longitud de cinco ó seis centímetros; se vuelve á poner el tubo al fuego, pero aun con mayor precaucion que antes, y se le calienta mas y mas hasta que el mercurio empiece á hervir. Despues que ha hervido algunos momentos se retira el tubo, se tapa con un tapon para evitar que se introduzca la humedad, y se deja enfriar. Esta operacion debe hacerse con las ventanas abiertas, ó á lo menos en una pieza bastante grande para que los vapores que se desprendan del mercurio cociendo no incomoden al que hace la operacion. Cuando el tubo se ha enfriado, se vuelve á tomar, se pone en él otra cantidad de mercurio igual á la primera, se le hace cocer de nuevo, y se repite todo varias veces hasta que el tubo esté casi lleno. Entonces se añade el mercurio que falta, pero no se hace hervir en el tubo, pues la ebullicion le arrojaria fuera; se pone el dedo sobre el orificio abierto, cuidando de no dejar debajo nada de aire, se le sumerge en el mercurio, volviéndole; la columna baja, y como no hay absolutamente aire ni vapor elástico sobre ella, su longitud mide exactamente la presion de la atmósfera.

Nos resta manifestar los medios que se emplean para medir con exactitud la longitud de esta columna. Una de las disposiciones mas cómodas es la que

representa la fig. 18, que es la construccion de los barómetros de Fortin. El tubo de vidrio está encerrado en otro de cobre que le proteje, y que está hendido á lo largo para que pueda verse la columna de mercurio. Este sistema está unido por la parte superior á una suspension movible en dos direcciones retangulares, de suerte que se halla siempre vertical por efecto de su propio peso. El vaso en que esté sumergido el tubo, tiene un fondo movible que se sube ó baja segun conviene por medio de un tornillo V, lo cual hace subir ó bajar el muelle esterior del mercurio en el vaso. Cuando se quiere observar la altura del barómetro, se hace uso de este movimiento para colocar la superficie del mercurio, de modo que toque exactamente á una punta de marfil muy fina P, colocada verticalmente en lo interior del instrumento. El tubo de cobre tiene marcadas divisiones, cuyo orígen corresponde con la mayor exactitud á esta punta de marfil; nó resta, pues, mas que ver á qué punto de estas divisiones llega el estremo superior de la columna de mercurio. Para que esta operacion pueda hacerse con mayor exactitud, el tubo de cobre tiene una corredera E, armada de un vernier que proporciona el poder apreciar hasta los décimos de milímetros; y á cuyo estremo inferior hay dos pequeños planos de cobre verticales que determinan un plano de mira perfectamente perpendicular á la direccion del tubo. Al hacer lo observacion, se mueve el vernier hasta que el plano de mira coincida exactamente con la convexidad superior del mercurio, y entonces la division marcada sobre el tubo indica precisamente la distancia que hay entre el plano de mira de la corredera y la punta de marfil P: distancia que es la altura de la columna barométrica sobre el nivel interior del vaso, y por consiguiente mide la presion de la atmósfera en el momento de la observacion. Es casi inútil advertir que durante esta, debe mantenerse el instrumento en una posicion perfectamente vertical.

Para hacer todas las operaciones de esta especie comparables entre sí, es necesario determinar la temperatura del mercurio que compone la columna barométrica; pues hemos visto ya que por cada grado del termómetro centesimal, la dilatacion del volúmen del mercurio es igual á $\frac{1}{5412}$ del volúmen que la masa ocupaba á 0.° De donde se sigue, que una misma cantidad de mercurio puesta en un cilindro de un radio constante, ocupará mayor altura á medida que su temperatura sea mas elevada, y su prolongacion será proporcional á la dilatacion de su volúmen. En consecuencia para juzgar de la masa por la altura, será preciso referir todas las observaciones á una misma temperatura, por ejemplo á la de 0°, lo cual se conseguirá restando de la longitud de la columna observada, $\frac{1}{5412}$ de la misma longitud, por cada grado que se halle elevada sobre 0.

Para conocer exactamente la temperatura de la columna barométrica se engasta en la montura misma del barómetro un pequeño termómetro muy sensible, y se observa el grado que indica; pues es claro que la temperatura del aparato no puede variar sin que sienta esta variacion el termómetro que forma un mismo cuerpo con él. Esta temperatura puede ser bastante distinta de la del aire esterior, no solo cuando el barómetro está colocado en una pieza cerrada, sino aun cuando está espuesto al aire libre; porque las variaciones de temperatura afectan mucho mas rápidamente á un fluido raro y ligero como el aire, que á una masa sólida como la del mercurio y el cobre de que está hecho el barómetro.

Sin embargo, debe tambien observarse la temperatura del aire, por medio de un termómetro muy sensible espuesto al aire libre á la sombra, y lejos de las paredes ó de cualquiera otro cuerpo que pueda comunicarle calor. El conocimiento de esta temperatura es muy útil para determinar completamente las circunstancias en que se halla la atmósfera en el momento de la observacion. Este es un dato ne-

cesario para el cálculo de las refracciones astronómicas, y para la determinacion de las diferencias de nivel por medio de observaciones barométricas, aplicacion importante de que hablaremos despues.

Cuando se quiere transportar el barómetro que acabamos de describir, se vuelve el tornillo V de modo que disminuyendo la capacidad del vaso, le llene el mercurio enteramente, y suba por esta diferencia hasta el estremo superior del tubo. Entonces se vuelve el instrumento, en que no puede entrar el aire, se le coloca en un estuche dispuesto de una manera conveniente y se transporta. Cuando se quiere observar de nuevo, se empieza colocando el aparato en una situacion vertical; se baja el fondo movible, y el mercurio baja tambien hasta que su nivel en el vaso toque al estremo inferior de la punta de marfil, y se acaba de hacer la observacion como hemos dicho anteriormente.

La longitud de la columna barométrica observada de este modo, en el mismo sitio, en el mismo instante, con barómetros igualmente purgados de aire y construidos con igual perfeccion, no es exactamente la misma. Es tanto menor, cuanto mas estrechos son los tubos, y la prueba de que esta variedad del diámetro interior es la única causa que la modifica, es que la diferencia deja de ser sensible pasando los tubos de cierto ancho, que puede fijarse, por ejemplo, en dos centímetros. Mas adelante haremos conocer la causa física de este fenómeno. Por el momento bastará decir que es la misma que hace que el agua se eleve sobre su nivel, y que el mercurio baje en los tubos estremamente sutiles llamados *capilares*, porque su diámetro interior se acerca á la finura de un cabello. Es fácil concebir sin mas esplicacion, que un efecto análogo debe verificarse en nuestros tubos barométricos: pero el conocimiento de la causa que le produce proporciona el medio de calcular las correcciones que exige, y que pueden verse en el tratado general.

El efecto que acabamos de esplicar se evita completamente oponiendo la causa que le produce á sí misma, como se ve en el aparato representado en la fig. 19, llamado *barómetro de Sifon*. Este barómetro no tiene vaso, ó mas bien el tubo mismo hace su oficio. Está encorvado por la parte inferior como lo manifiesta la figura, y por consiguiente forma dos bazos paralelos C S y C N. Se ha introducido el mercurio en el brazo mayor C S que estaba recto; se ha hecho hervir en él, como hemos dicho, para arrojar el aire; y en seguida se ha encorvado á la lámpara el brazo C N, colocando despues verticalmente el brazo C S. La columna que llenaba este brazo era mas larga què la columna barométrica ordinaria, y por consiguiente mas pesada que la presion atmosférica; y ha caido por el esceso de su peso, pasando parte al brazo corto C N. Esto supuesto, si el punto N, es el mas alto de la convexidad del mercurio en el brazo menor, y el punto S, el mas elevado de su convexidad en el brazo mas largo, es claro que la diferencia de nivel de estos dos puntos, es exactamente la longitud de la columna de mercurio sostenida por la presion que la atmósfera ejerce sobre la superficie N del brazo mas corto en que el aire penetra libremente, y para que esta diferencia de nivel sea independiente del efecto de la capilaridad que hemos reconocido en los tubos simples, basta que los dos brazos tengan hácia las estremidades de la columna diámetros interiores iguales; pues entonces siendo igual en una y otra parte la tendencia á la depresion, se contrabalancearán mútuamente.

Nos falta observar la diferencia de nivel de los dos puntos N y S. Para esto se marca una division A M vertical, y paralela á los brazos del tubo; una corredera horizontal H S, semejante á la de los barómetros simples, se mueve paralelamente á sí misma á lo largo de esta division. Se pone el plano de mira tangente á una de las estremidades de la columna, por ejemplo, á la cumbre de la convexidad

superior S, y se anota el punto correspondiente de la division; que será por ejemplo H, despues se baja la corredera á la otra estremidad de la columna N, y se repite en ella la misma operacion. Supongamos que el punto correspondiente de la division sea *h*, la distancia H *h* que indica la division, es la diferencia de nivel de los puntos N y S, y por consiguiente la altura de la columna barométrica.

La observacion se hace aun mas exactamente adaptando á la corredera un anteojo pequeño, en cuyo interior hay un hilo muy fino estirado; entonces se observa con la mayor precision el momento en que este hilo coincide con la superficie del mercurio en ambas estremidades.

Mr. Gay-Lussac ha hecho en el barómetro de sifon una modificacion que le hace portatil, y de un uso muy cómodo para los viajeros. Despues de construido el barómetro, se cierra á la lámpara el estremo del brazo menor, designado por Y en la fig. 20. En tal estado, el barómetro cerrado por todas partes seria inaccesible al aire esterior, y por consiguiente no podria indicar las variaciones de presion que este esperimentase; pero para restablecer la comunicacion, se hace interiormente hácia el medio del brazo Y, una pequeña salida terminada en un agujero sumamente fino y capilar T. Este agujerito permite que entre el aire esterior en el brazo C Y, pero no permite salir al mercurio en virtud de la fuerza con que le repele por su capilaridad. Asi, si se vuelve con cuidado el tubo, una parte del mercurio entre en el brazo largo C X, como manifiesta la fig. 21, y acaba de llenarle, el resto cae en el brazo corto C Y, pero no puede salirse por la pequeñez del agujero lateral T. Es fácil, pues, transportar el instrumento en esta posicion, quedando siempre abierto para el aire y cerrado para el mercurio. Mas es necesario que el tubo esté estrechado en la curvatura C, á fin de que la capilaridad mantenga siempre llena esta curvatura en cualquiera posicion.

Para hacer mas transportable el aparato, se rodea el tubo de una cubierta sólida en que se enloda. Se puede tambien, y es una grandísima ventaja, cubrir enteramente el brazo mayor, limitarse á observar las variaciones del mercurio en el mas pequeño. Para esto basta que los diámetros interiores de los dos brazos sean exactamente iguales en los sitios N y S, que pueden recorrer las estremidades de la columna; pues entonces al variar la presion atmosférica, el mercurio bajará tanto en un brazo como suba en el otro, y para conocer la variacion total que sufre la columna barométrica, basta medir la que sufre en el brazo menor, y tomar el duplo. A fin de obtener esta igualdad se elige un tubo que sea lo mas cilíndrico posible, se le corta en dos partes por medio de su longitud, y se usan para formar los estremos de la columna, soldándolas á otros tubos de vidrio de cualquiera diámetro. El mismo objeto se podria conseguir con un tubo que no fuese de igual diámetro en toda su longitud, dividiéndole en partes de igual capacidad, por el método que hemos enseñado hablando de la construccion de los termómetros. Conociendo de este modo la relacion de capacidad de ambos brazos, se podria calcular la elevacion del mercurio en uno de ellos por su descenso observado en el otro; pero esto no seria tan cómodo como la igualdad de capacidad en ambos brazos, que no es dificil de conseguir.

El barómetro portatil que acabamos de describir, segun el método de Mr. Gay-Lussac, puede encerrarse en un baston, y llevarse á todas partes con la mayor facilidad. Se le adapta como á los demas un pequeño termómetro, para conocer la temperatura del mercurio; y en fin para que los movimientos violentos que puede esperimentar en el viaje la columna de mercurio, no la lleven con demasiada fuerza hácia las estremidades del tubo de vidrio, lo cual podria romperle, se embarazan estos movimientos adelgazando el tubo cerca de sus estremidades

X, Y, de suerte que su diámetro interior en estos puntos sea mucho menor. Por este medio, cuando la columna de mercurio es arrojada con fuerza hácia uno de los estremos del tubo, su movimiento se retarda necesariamente al pasar por este pequeño orificio, y llega al mismo estremo con una velocidad demasiado pequeña para poder romperle. Es preciso, sí, tomar un tubo bastante largo, y hacer la diminucion bastante cerca de los estremos para que la parte superior S de la columna no se eleve nunca hasta ella en las observaciones, pues si sucediese esto, siendo el tubo demasiado estrecho en estos puntos, la depresion producida por la capilaridad seria demasiado considerable, y podria ocasionar grandes errores en las alturas observadas. Esta contraccion del tubo en sus estremidades es una precaucion que se toma en todos los barómetros destinados á viajar.

Empleando instrumentos como los que acabamos de describir, y sirviéndose de ellos con todas las precauciones que hemos recomendado, se harán observaciones barométricas, que no dejarán nada que desear respecto á la exactitud. Hemos creido deber entrar en estos detalles, tratándose de un instrumento que es de un uso contínuo en la física, la química, la astronomía y la geografía. La prueba de esta utilidad la veremos en las delicadas esperiencias para que nos va á servir muy en breve; pero antes es preciso hacer conocer algunas de sus aplicaciones generales.

Observando por mucho tiempo en un mismo sitio la longitud de la columna barométrica, ó lo que comunmente se llama *altura del barómetro*, se ve que no permanece siempre la misma. En los primeros tiempos despues de la invencion del barómetro, se creia que el mercurio estaba mas alto en tiempo de lluvia, y mas bajo en el buen tiempo (1), y aun

(1) Tal era la opinion de Pascal. Véase su tratado sobre el equilibrio de los líquidos.

se encontraban razonamientos para apoyar esta pretendida observacion; porque se decia, cuando debe llover, el aire está cargado de agua; por consiguiente el peso de la atmósfera es mas considerable; y por el contrario este peso debe ser menor en el buen tiempo, porque la atmósfera esta descargada de la humedad que contenia. Por desgracia de este sistema, se ha hallado despues que la cantidad de agua que el aire puede contener aumenta á medida que se calienta, de suerte que en verano contiene generalmente mucha mas agua que en invierno, aunque el tiempo es mucho mas hermoso: tambien se ha hallado que el vapor del agua es mas ligero que igual volúmen de aire, cuando es capaz de ejercer la misma fuerza elástica, es decir, que si se reemplazase un centímetro cúbico de aire tomado á cierta altura de la atmósfera, por un centímetro cúbico de vapor de agua que estuviese á la misma temperatura, y tuviese la misma fuerza elástica, este vapor pesaria menos que el volúmen de aire que reemplazaba, y por consiguiente produciria una presion menor sobre el barómetro; de donde se ha inferido lo contrario de lo que se pensaba al principio, es decir, que cuando el barómetro se eleva debe hacer buen tiempo, y debe llover cuando baja. En efecto, esto es lo que indica la esperiencia mas comunmente; pero á decir verdad, la razon que se da no vale mucho mas que la que se ha abandonado: hay otra causa que parece mas verosímil, y que indicaremos luego que hayamos estudiado el modo de existir en el aire los vapores acuosos. Entre tanto limitémonos á considerar estas variaciones accidentales como unidas de un modo cualquiera al estado de la atmósfera, y observémoslas menudamente.

Su estension no es igual en todas partes: son casi nulas sobre las montañas elevadas y entre los trópicos; aun en las zonas templadas no son nunca muy considerables en tiempo sereno; pero casi siempre el barómetro baja rápidamente antes de las tempestades;

y cuando se verifican, sufre grandes oscilaciones en algunas horas, lo cual le hace muy útil en el mar á los navegantes instruidos. La altura media del barómetro al nivel del mar es en todas partes la misma con muy corta diferencia; sin embargo, se cree haber reconocido que es un poco menor en el hemisferio austral. Al nivel del oceano, esta altura media es 0, 7629 metros (28 pulgadas, 2 líneas $\frac{2}{10}$) estando la temperatura á 12,° 8 del termómetro centígrado; en Paris al nivel del Sena es de 0,76 metros (28 pulgadas $\frac{9}{10}$ líneas) y segun las observaciones de Roheult, continuadas por quince años consecutivos, varía en esta ciudad entre 0,766981 metros (28 pulg., 4 lín.) y 0,749610 metros (26 pulg. 7 lín.), siendo en ella la temperatura media de 12.°

La delineacion gráfica es la manera mas cómoda de reunir comparativamente largas series de observaciones barométricas. Para esto se usa de una larga tira de papel, por medio de la cual se tira una línea recta que la atraviese de parte á parte, destinada á representar la altura media del barómetro en el sitio de la observacion. Se la divide en cierto número de partes iguales para representar los dias; y paralelamente á esta línea, tanto encima como debajo de ella, se tiran otras á distancias iguales, como por ejemplo, de un milímetro; hecho esto, cuando un dia se ha observado el barómetro, si señala la altura media, se marca con una señal el punto de la línea principal que corresponde á este dia; si está un milímetro mas alta, se hace la señal en la primera paralela sobre la principal; si está mas baja se señala bajo la línea principal en la paralela que corresponda; y asi sucesivamente se marcan las observaciones de todos los dias, cada una en la division y altura que le corresponde. Se puede tambien, y es mucho mas exacto, repetir las observaciones varias veces cada dia, señalándolas cada una en su sitio, dividiendo en partes iguales el intervalo que corresponde á un dia; y si por todos los puntos determi-

nados de esta manera, se hace pasar una línea que los una, siguiendo todas sus irregularidades, esta línea representará fielmente con sus ondulaciones el estado del barómetro en las épocas sucesivas en que se le haya observado. Ahora bien, examinando un cuadro de esta especie se ve que ordinariamente cuando ha bajado el barómetro ha llovido, y por el contrario se ha serenado el tiempo cuando ha subido. Se ven algunas veces escepciones á esta regla, pero son mucho menos numerosas que los casos en que se verifica.

Comparando asi la serie de las alturas del barómetro observadas en diferentes sitios, tan distantes como Paris y Clermont, ó Londres y Ginebra, se descubre una notable correspondencia en las variaciones de la columna de mercurio, lo cual supone en el movimiento de las capas atmosféricas una especie de simultaneidad que hubiera sido dificil sospechar.

Tambien si se comparan entre sí una larga serie de observaciones hechas en un mismo sitio, se nota que á pesar de las irregularidades accidentales de su marcha, tienen sin embargo una tendencia general, que les hace subir ó bajar periódicamente á diferentes horas del dia. Por una larga serie de observaciones de esta especie ha reconocido Mr. Ramond, que en Francia el barómetro tiene su máximum de altura hácia las nueve de la mañana, despues de lo cual baja hasta cerca de las cuatro de la tarde en que llega á su minimum; sube de nuevo hasta las once de la noche, en que vuelve á tocar á su maximum, y despues baja hasta cerca de las cuatro de la mañana, que empieza á subir para volver al maximum á las nueve. Esta marcha se altera con frecuencia en nuestros climas de Europa, en que es tan variable el estado de la atmósfera; pero bajo los trópicos, en que son mas constantes las causas que obran sobre la atmósfera, el periodo lo es tambien, en tal estremo, que segun Mr. de Humboldt, podria llegarse á conocer la hora en cualquier instante del dia ó

de la noche, con sola la observacion de la altura del barómetro, y lo que es estraordinariamente notable es que segun ha comprobado el mismo viajero, ninguna circunstancia atmosférica, ni la lluvia, ni el buen tiempo, ni el viento, ni las tempestades alteran la perfecta regularidad de esta oscilacion que permanece la misma en todos tiempos y en todas ocasiones.

Trasladando un mismo barómetro á diferentes alturas sobre el nivel del mar, se ve bajar el mercurio en el tubo á medida que el sitio es mas elevado. Asi la longitud media de la columna barométrica que hemos visto que es de 76 centímetros ó 28 pulgadas al nivel del mar, es poco mas que de 38 centímetros ó 14 pulgadas en la cumbre del Gran San Bernardo; aun es mas pequeña en la cumbre del Monte Blanco, que es mas elevado, y se la ve aun menor elevándose á mayores alturas en los viajes aereos. Esto proviene de que á medida que es mayor la elevacion, el barómetro se halla descargado del peso de las capas de aire inferiores; la superficie libre del mercurio del vaso se encuentra menos oprimida que antes, y por consiguiente el mercurio que contrabalancea esta presion en el tubo vacío del barómetro debe elevarse en él á menor altura. Si la densidad del aire fuese la misma á cualquiera elevacion, es decir, si el aire contuviese siempre bajo el mismo volúmen la misma cantidad de materia pesante, seria fácil calcular que les debia seguir la diminucion de la columna de mercurio á medida que se elevase el punto de su colocacion. Porque cuando el barómetro se halla á 76 centímetros y la temperatura del aire á 0.°, se sabe por esperiencia que es preciso elevarle 10,5 metros para hacer bajar el mercurio un milímetro; de suerte que en estas circunstancias un cilindro de mercurio de un milímetro de altura, pesa tanto como un cilindro de aire de la misma base, y de 10, 5 metros ó 10500 milímetros de altúra; lo cual se comprueba pesando comparati-

vamente volúmenes iguales de aire y de mercurio. Por consiguiente si á cualquiera altura de la atmósfera se verificasen las mismas circunstancias, cada milímetro de la columna barométrica de 760 milímetros corresponderia á una altura de aire de 10,5 metros, y la altura total de la atmósfera seria igual á 760 veces 10,5 metros ó 7980 metros, que son al rededor de 4000 toesas; pero esta elevacion es mucho menor que la realidad. Hay sobre la tierra montañas casi tan altas como este límite, por ejemplo, el Chimborazo en América; y no puede creerse que toquen á los confines de la atmósfera, puesto que se ven muchas veces nubes y aun pájaros remontarse mucho mas arriba de sus cumbres. El error de nuestro cálculo proviene de que no hemos contado con una de las propiedades físicas del aire, que es su compresibilidad. El aire es compresible, es decir, que tomando una masa cualquiera de aire, se la hacen ocupar espacios cada vez menores; ademas es elástico, es decir, procura volver á ocupar su volúmen cuando ha estado comprimido. La constitucion de la atmósfera es un resultado necesario de estas propiedades físicas, y es fácil deducirle de ellas. Puesto que el aire es pesado, las capas inferiores estan mas comprimidas que las superiores, cuyo peso sufren; pero en virtud de su elasticidad deben resistir á esta presion, y hacer esfuerzos para estenderse. De aqui resulta que la densidad de las capas inferiores de la atmósfera, debe ser mucho mayor que la de las capas superiores. Esto se hace sensible en las montañas muy elevadas; y en los viajes aerostáticos á grandes alturas, el aire se rarifica de tal modo que cuesta trabajo respirar. Asi es, que para hacer bajar el mercurio un milímetro, no basta entonces elevarse otros 10,5 metros, sino que es necesaria una altura mucho mas considerable; porque un cilíndro de aire de 10,5 metros tiene entonces mucho menos masa que tendria tomado en la superficie de la tierra. Para reconocer la ley que seguia esta variacion de pe-

sos se ha empleado al principio la observacion directa; y elevando sucesivamente un mismo barómetro á diferentes alturas, se ha podido conseguir una regla bastante segura para determinar con solas las observaciones del termómetro y barómetro la diferencia de nivel de dos puntos. Pero este resultado, utilísimo á la geografia y á la historia natural, no ha podido establecerse con seguridad sino despues que se han conocido por medio de la esperiencia todas las causas físicas que pueden influir sobre la presion del aire á diferentes alturas, y se ha conseguido sujetarlas al cálculo. Esto es lo que ha hecho Mr. Laplace, y puede verse en el tratado general la fórmula que ha obtenido.

CAPITULO VI.

Correspondencias del barómetro y el termómetro.

Acabamos de hacer conocer los dos instrumentos mas útiles de la física y de la química. Hemos esplicado su construccion, su uso y sus aplicaciones mas inmediatas, es decir, las indicaciones que nos dan sobre la temperatura y la presion del aire, ya en un mismo sitio á diferentes alturas, ya á la misma altura en diferentes climas. Ahora vamos á hacer uso de ellos para examinar rigurosamente y medir con toda exactitud muchos fenómenos notables, que hasta aqui no hemos hecho mas que sospechar.

Hemos dicho que si se sumerge un termómetro en un vaso de agua pura, y se hace hervir esta agua por medio del fuego, el mercurio del termómetro se mantiene siempre en el mismo grado durante la ebullicion; lo cual es fácil de esperimentar, y nos ha suministrado un punto fijo de nuestra escala termométrica. Pero si se repite la esperiencia en diferentes dias, cuando el barómetro indica presiones de aire sensiblemente distintas, se hallará que este término no es siempre el mismo, sino que es

mas alto cuando es mayor la presion atmosférica, y mas bajo á medida que esta es mas débil. Conforme á este principio debe creese que si la presion disminuyese aun mas, el grado en que se verifica la ebullicion bajaria mas y mas. Esta indicacion se puede comprobar subiendo á montañas elevadas, y haciendo cocer agua á diferentes alturas, pues hemos visto que el barómetro baja á medida que la altura es mayor. Si hemos marcado con el número 100 el término del agua hirviendo en la superficie de la tierra, en un momento en que el barómetro marcaba 0,76 metros, que es la presion media de la atmósfera al nivel del mar, cuando nos hayamos elevado lo necesario para que el barómetro no marque mas que 0,75, el agua empezará á hervir, señalando el termómetro menos de 100.° y en general habrá una correspondencia constante entre el descenso de este grado, y la indicacion del barómetro. Se pueden determinar las relaciones de estos dos fenómenos por esperiencias hechas á diversas alturas; y entonces se podrá calcular el grado á que hervirá el agua, segun la elevacion del barómetro, y recíprocamente cuál será la elevacion del barómetro, segun el grado á que hierva el agua. Pero se obtienen resultados aun mas seguros y mas generales por otro método que indicaremos muy pronto, y que no ocasiona ninguna incomodidad. Por el momento nos limitaremos á dar un resultado, que puede mirarse como fundado únicamente en la esperiencia, y que se puede comprobar con ella, el cual basta para arreglar completamente todos los termómetros en los sitios que no se hallen á mas de 400 metros (200 toesas) sobre el nivel del mar. Este resultado consiste en que cuando la presion barométrica no es muy diferente de 28 pulgadas de la antigua division, ó de 0,76 de la division métrica, un aumento ó diminucion de una pulgada en esta presion, corresponde exactamente á 1.° de la division centesimal de la temperatura del agua hirviendo, es decir, que si la presion en lu-

gar de ser de 28 pulgadas, es, por ejemplo, de 27, el punto de la ebullicion en lugar de ser 100.° corresponderá á 99°; de modo que si se quiere arreglar un termómetro en esta circunstancia, y se ha marcado en ella el punto de la ebullicion y el del deshielo, será preciso dividir el intervalo en 99 partes iguales para tener grados centesimales, y para que el termómetro marque 100.° en el agua hirviendo cuando el barómetro esté á 28 pulgadas. Lo contrario sucederia si este se hallase á 29 pulgadas; entonces el punto de la ebullicion seriá 101.°, y habria que dividir en 101 partes el intervalo comprendido entre este punto y el del hielo al derretirse.

Es preciso no olvidar que para hacer estas esperiencias con toda exactitud se debe usar de agua destilada, de lluvia ó de nieve perfectamente pura; porque casi todas las aguas de rio y de fuente contienen en disolucion sales, que combinadas con ellas retardan su ebullicion.

Cuando se hace hervir agua sobre las montañas, se verifica otro fenómeno, que conviene tener conocido, y es, que á proporcion que el sitio es mas elevado, se halla mayor dificultad en hacer hervir el agua, sin embargo que hierve á grados mas bajos que en la superficie de la tierra; esto consiste en la dificultad que hay de mantener el fuego que ha de hacerla hervir. Cuanto mas elevado, el aire se hace *mas raro*, es decir, tiene menos masa, en igual volúmen. Ahora bien, uno de los principios constituyentes del aire que se llama *oxígeno*, es el alimento único y esencial de la combustion; ó mas bien un fenómeno llamado *combustion*, no es otra cosa que la combinacion que se hace de este principio con los cuerpos combustibles, lo que prueban los químicos de una manera que no deja duda. Cuando soplamos el fuego, no hacemos otra cosa que dirigir sobre los cuerpos combustibles una masa mayor del oxígeno contenido en el aire. Vengamos ahora á la

aplicacion. Puesto que elevándose en la atmósfera el aire se enrarece mas y mas, es menester soplar y conducir un volúmen mayor de aire sobre el combustible para que haya en realidad la misma masa de oxígeno; por consiguiente en igual volúmen debe suministrar al fuego un alimento menos activo, y aumentarse con la altura la dificultad de mantenerle encendido.

Segun lo que acabamos de decir sobre la variabilidad de la temperatura necesaria para que el agua hierva, podria creerse que de un modo análogo variaba igualmente con la presion barométrica el término á que se derrite el hielo, y forma el otro estremo de la escala; pero las esperiencias mas exactas no manifiestan en él la mas mínima variacion, no solo sobre las montañas mas elevadas, sino aun en un espacio enteramente vacío de aire. Solo es preciso distinguir el término á que se derrite el hielo, que es fijo, del de la congelacion que no lo es.

CAPITULO VII.

Leyes de la condensacion y de la dilatacion del aire y de los gases bajo diferentes presiones á una misma temperatura.

Las esperiencias que acabamos de hacer nos han enseñado que las capas de aire situadas junto á la superficie de la tierra se hallan comprimidas por todo el peso de las capas superiores. Este peso sobre cada unidad de superficie puede mirarse como equivalente al de una unidad de mercurio que tuviese por base esta superficie, y cuya altura media al nivel del mar fuese de 76 centímetros. Ahora bien, ¿qué sucederia á una masa de aire que estuviese oprimida por un peso mas considerable? Segun lo que hemos reconocido de la compresibilidad del aire, debemos esperar que se condensaria, y se contraeria en sí misma, de modo que ocupase un espacio

menor que antes. Pero ¿cuál seria la ley de estas condensaciones; y qué relacion habria entre el volúmen de una masa de aire y la presion que obra sobre ella? Esta es una cuestion muy importante, y cuyas aplicaciones se presentan sin cesar, como veremos en toda esta obra: es necesario, pues, recurrir á la esperiencia para decidirla.

Se consigue fácilmente de la manera que sigue inventada por Mariotte. Se toma un tubo de vidrio cilíndrico y encorvado ABC, fig. 22, cerrado por el estremo C y abierto por el otro; se pone en él un poco de mercurio hasta la línea horizontal DE, á fin de que el aire encerrado en el brazo mas corto CE no esté mas ni menos comprimido que el que se halla en el brazo mayor AD, que comunica con la atmósfera. Este brazo debe ser mucho mas largo que el otro. Estando asi el mercurio á una misma altura por una y otra parte, é interceptada la comunicacion entre los dos brazos, se pone por el estremo A con un embudito una nueva cantidad de mercurio, teniendo cuidado de que no entre nuevo aire en el espacio CE. Entonces se observará que el mercurio sube poco á poco hácia E, condensando asi el aire que se hallaba encerrado en CE; pero subirá mucho menos en este brazo que en el otro. Si la longitud de EC es, por ejemplo, de 32 centímetros, y el aire se halla reducido en él á no ocupar mas que la mitad de este espacio, es decir, 16 centímetros, lo cual hará subir la superficie del mercurio hasta F, tirando una línea horizontal FG, se hallará que el mercurio ha subido en el otro brazo mas arriba de esta línea una cantidad GH, exactamente igual á la altura del barómetro en el momento de la observacion; de suerte, que el aire contenido en el espacio CE está oprimido por el peso de la atmósfera que pesa sobre H, y por el de otra atmósfera, representada por la columna de mercurio HG, pues las dos columnas iguales GD, FE, se equilibran mútuamente, y no deben contarse na-

ra nada. Esta doble presion que se ejerce en G reduce, pues, el aire CE á la mitad de su volúmen. Si se añade nuevamente mercurio al brazo mayor, el aire contenido en el mas pequeño se condensará aún; y cuando esté reducido al tercio de su volúmen, esto es, cuando la superficie del mercurio en este brazo llegue á F′, si se tira la horizontal F′ G′ se hallará que el mercurio se ha elevado sobre esta línea en el brazo mayor una cantidad G′ H′, doble de G H, es decir, igual al peso de dos atmósferas; lo cual, unido al peso de la atmósfera esterior que obra sobre H′, forma en todo un peso igual al de tres atmósferas que pesan sobre el aire CF′; y esta triple presion, reduce, como se ve, el aire CE á la tercera parte del volúmen que ocupaba al principio. En general se hallará siempre, que el volúmen á que se reduce el aire contenido en el brazo mas pequeño es recíprocamente proporcional al peso con que está cargado. Asi, partiendo de su volúmen inicial, cuando solo se halla cargado con el peso de la atmósfera, señalado por la altura actual del barómetro, se podrá calcular de antemano á cuánto deberá reducirse con otra presion dada, que se medirá por la suma total de las columnas de mercurio comprimentes.

Ahora es fácil conocer por qué hemos recomendado que fuese cilíndrico el brazo CE, á fin de que longitudes iguales tomadas sobre este brazo correspondiesen á volúmenes de aire iguales entre sí: lo cual hace la ley mas evidente y la esperiencia mas fácil de esplicar. Pero como es dificil encontrar tubos que satisfagan completamente á esta condicion, es necesario saber suplirla. Se consigue dividiendo desde luego el brazo CE en partes de igual capacidad por el método esplicado en la pág. 153. Entonces se trazan sobre el mismo tubo divisiones correspondientes á estas capacidades, y se valúa el volúmen del aire en todos los periodos de la esperiencia, segun el número que ocupa de estas divisiones. Es

inútil hacer lo mismo respecto al brazo largo; ni aun hay necesidad de que sea cilíndrico, porque la presion vertical de un fluido pesado no depende del ancho del vaso que le contiene, sino de la altura vertical de la columna fluida. Asi, despues de haber dividido el brazo CE en partes de igual capacidad no es necesario mas que adaptar al aparato una division vertical que proporcione medir exactamente la diferencia de nivel del mercurio en sus dos brazos. Para esto nada mas sencillo que colocar el tubo encorvado ABC sobre una tabla dividida en milímetros y armada de una corredera vertical.

A fin de que la esperiencia sea enteramente exacta, y que la reciprocidad de las presiones y los volúmenes sea precisamente la que hemos enunciado, es necesario observar una condicion esencial, á saber, que el aire encerrado en CE esté perfectamente seco, igualmente que el mismo tubo CE; porque el vapor acuoso que puede hallarse mezclado con este aire, ó que se desprendiese de las paredes del tubo, no se comprimiria por la presion siguiendo las mismas leyes que el aire, como veremos despues; y por consiguiente su mezcla alteraria la exactitud de los efectos que convienen al aire solo. A fin de evitar esta causa de error es preciso ante todas cosas calentar fuertemente el tubo para secarle; despues se le hará comunicar por algunos dias, segun representa la fig. 23, con el interior de un recipiente RR, que se colocará sobre mercurio bien seco, encima del cual se pondrá muriate de cal, ú otras sales susceptibles de atraer la humedad. Cuando se crea que el aire contenido en el recipiente está bien seco, se quitarán estas sales, y se cerrará el orificio inferior del recipiente con un vidrio plano esmerilado, que se hará escurrir sobre el mercurio.; y volviendo todo el aparato, el poco mercurio que haya quedado bajo el recipiente caerá en el tubo y cortará toda comunicacion entre los dos brazos AD, CE, de suerte, que el aire seco contenido en el menor

no podrá ya percibir humedad. Hecho esto se separará el tubo del recipiente, se medirá la diferencia primitiva del mercurio en ambos brazos, y se continuará la esperiencia como hemos dicho. Obrando con estas precauciones se hallará que la ley enunciada por Mariotte es rigorosamente exacta.

Introduciendo el mercurio de este modo podrá suceder que se halle un poco mas alto en el brazo mayor que en el mas corto, por ejemplo, en D′ en el primero y en E′ en el segundo, fig. 24. En este caso se tirará la línea horizontal E′ d′, y se medirá la diferencia de nivel D′ d′, ó lo que es lo mismo, se verá en la division del instrumento. Añadiendo á esta diferencia la altura actual del mercurio en el barómetro, la suma espresará la presion total que sufre el aire encerrado en C′ E.′ Asi se podrá calcular el volúmen que este mismo aire hubiera debido ocupar bajo la presion atmosférica sola, aumentando proporcionalmente á C′ E′, segun la relacion de ambas presiones. Conocido este volúmen inicial se concluirá la esperiencia como anteriormente.

El mismo aparato serviria tambien para esperimentar todos los demas gases, bastando llenar el recipiente con estos gases en lugar de aire. (*) Es verdad que el aire atmosférico que quedase en el tubo

(*) Todos los que han visto un laboratorio de química conocen el método que se emplea para llenar de gas un recipiente. Se llena este primeramente de agua ó de mercurio, del cual se hace uso cuando se quiere que el gas esté seco. Hecho esto se tapa su orificio, y se vuelve como un tubo de barómetro, sumerjiéndole por este orificio en una cuba llena del mismo líquido. La presion del aire esterior sostiene al líquido introducido en el recipiente, como al mercurio en el barómetro: y no se verifica formarse el vacío, á no ser que el recipiente tenga mas de 76 centímetros de altura. Se toma un frasco lleno de gas: se le sumerje en el mercurio sin abrirle, y se abre manteniendo hácia abajo su orificio; se acerca este al del recipiente en que se quiere introducir el gas; se inclina el frasco, y elevándose el gas por medio del líquido va á reemplazar el que llenaba el recipiente. Se ve, pues, que esta es una aplicacion de la esperiencia de Torricelli.

se mezclaria con el gas; pero su influencia se disminuiria empleando un recipiente, cuyo volúmen sea muy considerable relativamente al del tubo; y aun sin esta precaucion no resultará ningun error, porque haciendo la esperiencia se verá que la mezcla del aire y un gas seco se condensa por la presion del mismo modo que el aire solo; lo cual prueba de un modo incontestable que la ley observada no corresponde particularmente al aire, sino que es la misma respecto á todos los gases secos.

La esperiencia anterior solo nos hace conocer esta ley respecto á presiones mas fuertes que la de la atmósfera; ¿subsistirá tambien respecto á menores presiones? Para esperimentarlo tomemos un tubo de vidrio, cuyo diámetro no esceda de dos milímetros, y despues de haberle dividido en partes de igual capacidad introduzcamos en él una pequeña columna de mercurio. Esta columna, en razon de la pequeñez del diámetro del tubo, no se separará para dejar salir el aire encerrado; y si se pone verticalmente el tubo, de modo que el mercurio se halle sobre el aire, le comprimirá con su peso. Por el contrario, si se vuelve el tubo de modo que quede abajo la parte abierta, la columna de mercurio bajará; pero si la hemos proporcionado bien no saldrá del tubo, sino que se detendrá en cierto punto. De aqui deduciremos que el aire interior ha perdido parte de su fuerza elástica dilatándose; porque si la columna de mercurio se detiene es porque su peso, mas la elasticidad del aire interior, equilibran el peso de la atmósfera. Podremos valuar esta fuerza elástica observando las divisiones en que se detiene la columna de mercurio en ambas posiciones opuestas, y veremos que el volúmen del aire contenido en el tubo es siempre recíprocamente proporcional á los pesos que obran sobre él, del mismo modo que hemos hallado respecto á las presiones mas fuertes cual es el peso de la atmósfera.

Si se quieren comparar estos volúmenes al que

ocuparia la misma masa de aire, suponiéndola comprimida por el peso de la atmósfera, bastará poner el tubo en una situacion horizontal. Entonces la columna de mercurio introducida en él será sostenida por las paredes del tubo sin pesar sobre el aire interior ni esterior, y por consiguiente la presion atmosférica sola determinará el volúmen del aire interior. Reduciendo este volúmen en proporcion á las presiones que se notan cuando la pequeña columna de mercurio pesa sobre el aire de adentro y el de afuera se volverán á hallar los espacios ocupados por el aire interior en estas dos suposiciones. Este sencillísimo método de hacer la esperiencia sobre el aire dilatado es de Mr. Dalton. Para que se verifique con exactitud la ley á que conduce es preciso tambien, como en las primeras esperiencias, que tanto el tubo como el aire interior esten perfectamente secos. Para esto se pueden imaginar diferentes medios análogos al que acabamos de indicar; y muy en breve espondremos uno sencillísimo al tratar de la dilatacion de los gases. Insistimos sobre esta precaucion, porque es necesario imponerse la ley de no descuidar nunca ninguna de las circunstancias que pueden conducir á la exactitud de las operaciones; pues si se hiciesen las que acabamos de describir con el aire ordinario sin ninguna preparacion se cometerian errores que parecerian de poca consideracion, y que regularmente se atribuirian á la inseguridad de la observacion. Esto es lo que sucedió á Boyle y á Mariotte, que fueron los primeros que hicieron estas esperiencias; las diferencias que necesariamente debieron encontrar, ocasionadas por la humedad del aire, no les impidieron reconocer la ley general que unia los resultados; sin embargo, hubieran notado algunas alteraciones de esta ley si hubiesen obrado de un modo mas exacto; alteraciones que desaparecen respecto á nosotros que las comprendemos, porque conocemos tambien su causa y sabemos correjirlas.

Para no omitir nada debemos decir que las esperiencias sobre la compresion y la dilatacion del aire no serian enteramente exactas si se las hiciese suceder unas á otras con demasiada rapidez; porque al comprimir el aire se produce calor y frio al dilatarle, y este calor ó frio aumenta ó disminuye su volúmen bajo la misma presion. Estas causas accidentales influirian, pues, sobre el volúmen del aire de un modo que seria estraño respecto á los fenómenos que se consideran si no se les diese tiempo para disiparse, para lo cual bastan algunos instantes. Se puede tambien hacer sensible la ley de Mariotte sobre el aire dilatado por medio de la esperiencia siguiente debida á este físico, y cuyos resultados son de una aplicacion muy diferente. Tómese un tubo de barómetro dividido en partes de igual capacidad; llénese una parte de él de mercurio hervido, como si se quisiese hacer un barómetro; póngase verticalmente con el estremo cerrado á la parte de abajo, y véase cuántas divisiones ocupa el aire que queda sobre el mercurio, y obsérvese al mismo tiempo la altura del barómetro que indica la presion de la atmósfera. Tápese este tubo con el dedo ó con un vidrio esmerilado, y vuélvase sumerjiendo su estremo abierto en un vaso lleno de mercurio. Por este movimiento el aire subirá á la cumbre del tubo, y cuando se quite el dedo que se opone á su resorte se dilatará, y hará bajar la columna de mercurio interior mas abajo de donde llegaria en un tubo barométrico, cuyo estremo estuviese vacío. En fin, despues de algunas oscilaciones la columna interior se fijará en un punto tal, que la fuerza elástica del aire interior debilitada por su dilatacion, mas el peso de la columna de mercurio que aun queda en el tubo equilibren al peso de la atmósfera. Segun esta condicion y la ley de Mariotte es fácil calcular la altura á que deberá fijarse la columna de mercurio, y el cálculo y la observacion estan exactamente conformes.

En el dia, que está bien comprobada por la es-

periencia la ley de Mariotte, se emplea como un hecho; sea para calcular los volúmenes que debe tomar una masa de aire bajo diferentes presiones, sea para reducir á una presion constante los volúmenes de aire observados bajo presiones diferentes. Estas reducciones son indispensables en una multitud de esperiencias. Si se ha recojido, por ejemplo, bajo un tubo barométrico un volúmen CH de un gas cualquiera, fig. 25, no es posible limitarse á decir que este gas ocupaba el volúmen CH, sino que es preciso decir la presion que entonces sufria. Esto se puede saber las mas veces por la esperiencia, metiendo el tubo en el mercurio hasta que el nivel interior H iguale al esterior AB. Entonces el aire interior no se halla comprimido sino por la presion de la atmósfera; y se esplicará exactamente el volúmen que ocupa en el tubo, indicando al mismo tiempo su temperatura y la altura BP del mercurio en el barómetro en el mismo instante, ó bien se podrá reducir por el cálculo á una presion constante, por ejemplo, de 76 centímetros, multiplicándole por la relacion de la presion atmosférica actual á 0,76. Esta reduccion servirá para referir á iguales circunstancias todos los volúmenes que se observen.

Pero pueden ofrecerse casos en que sea imposible conducir asi el volúmen interior hasta la igualdad de nivel, como sucederá, por ejemplo, si la cuba en que está sumerjido el tubo no es bastante profunda. En este caso hay que recurrir al cálculo. Se observa el espacio CH ocupado por el gas; la altura AH del mercurio interior sobre el nivel de la cubeta; y en fin, la presion atmosférica actual, segun la altura BP del mercurio en el barómetro. Restando AH de esta altura, la diferencia BP — AH espresa la verdadera presion que sufre el aire interior. Asi, habiendo medido su volúmen actual CH, se podrá referir por el cálculo á cualquiera otra presion, por ejemplo, la de 0,76: lo cual hará comparables todas las observaciones de esta especie. Ob-

sérvese que en estas esperiencias no es necesario que el tubo CH sea cilíndrico, pues basta que esté dividido en partes de igual capacidad, y que se mida la altura AH con una regla dividida, ó mejor por una escala de partes iguales, señalada en sus paredes esteriores.

Lo que acabamos de decir respecto al mercurio se aplica igualmente al agua; pero siendo el agua unas trece veces y media menos pesada que el mercurio, es preciso dividir la altura AH por 13,5 para compararla con la columna barométrica. Pero ordinariamente cuando se opera sobre una cuba llena de agua se puede establecer el nivel por esperiencia; con lo cual se evita toda reduccion.

En todos los cálculos que acabamos de hacer sobre los diferentes volúmenes que puede ocupar una misma masa de aire ó de gas, hemos supuesto que permanecia siempre á la misma temperatura. Esta condicion es necesaria, pues la variacion de temperatura de un gas hace variar su volúmen aunque la presion sea constante. Mas adelante examinaremos las leyes de la dilatacion que nacen de la variacion de temperatura; y combinándolas con los resultados que acabamos de obtener, inferiremos las que deben verificarse cuando varian al mismo tiempo la presion y la temperatura; pero nos falta adquirir muchos datos antes de emprender la resolucion de este problema. Por ahora nos limitaremos á decir, que *sometiendo sucesivamente á diferentes presiones una masa de aire ó de gas seco, cualquiera que sea la temperatura, con tal que sea constante, los volúmenes que ocupa dicha masa son siempre reciprocamente proporcionales á las presiones que sufre.*

CAPITULO VIII.

De las bombas para líquidos y para gases.

Aunque el cálculo de las bombas pertenece á la mecánica, sin embargo, como sus propiedades dependen de la fuerza elástica del aire, y son de un uso tan frecuente, vamos á dar aqui una idea sucinta de ellas.

La especie de bomba que se llama absorvente se compone de un tubo pequeño AH, fig. 26, unido á otro tubo mayor AB, llamado cuerpo de la bomba. Dentro de este sube y baja por medio de la espiga MV un embolo P, que ordinariamente es un cilindro de madera torneado y revestido de estopa, que llena exactamente la capacidad interior del cuerpo de bomba AB. En la union de los dos tubos AB, AH hay una válvula S, y otra S′ en el embolo P. La disposicion de estas válvulas es tal, que la que está marcada con la letra S se abre natural y fácilmente para dar paso á todo lo que haya de entrar en el cuerpo de bomba AB; pero en el momento que deja de estar sostenida de este modo vuelve á caer por su propio peso y se cierra exactamente; de suerte, que si alguna cosa pretende salir del cuerpo de bomba le impide absolutamente el paso. La otra válvula, señalada con S′, se abre en la misma direccion, y del mismo modo que la anterior, para dar paso á todo lo que hay en el cuerpo de bomba bajo el embolo P cuando procura pasar sobre él; pero se cierra tan exactamente por su propio peso, que impide absolutamente el paso de la parte de encima del embolo á la de abajo.

Supongamos ahora que habiendo bajado el embolo P hasta el fondo del cuerpo de bomba AB, se mete en el agua la parte inferior del tubo AH. Entonces, elevando el embolo por el cuerpo de bomba, por ejemplo, hasta B, se formará un vacío de-

bajo de él; el aire interior del tubo AH se dilatará para llenarle; y su fuerza elástica, disminuida por esta dilatacion, será menor que la presion esterior de la atmósfera; la cual hará subir por el tubo AH, y acaso hasta el mismo cuerpo de bomba, una columna de agua, cuyo peso compense esta debilidad. Supongamos que se verifica el último caso, y llega á entrar alguna cantidad de agua en el cuerpo de bomba AB. Esta agua que ha entrado no puede volver á salir por impedírselo la válvula S′, que se cierra por su propio peso: luego volviendo á bajar el embolo P hasta esta agua, levantará la válvula S′, y pasará sobre el embolo; de donde no podrá volver á bajar, á causa de la válvula S.′ Volviendo, pues, á subir el embolo se subirá esta agua que hay sobre él: pero al mismo tiempo volverá á formarse debajo un nuevo vacío; volverá á entrar otra cantidad de agua en el cuerpo de bomba, y se hallará encerrada en él, igualmente que se halló la primera por efecto de la válvula S. Esta cantidad de agua pasará en seguida sobre el embolo P al bajar este; y aumentando con este juego alternativo la cantidad de agua encima del embolo llegará al fin al orificio O, abierto en uno de los lados del cuerpo de bomba, y se saldrá por él.

Se ve, pues, que en esta clase de bombas es necesario que la altura de la válvula S sobre el nivel del agua, que rodea el tubo AH, no escede de 10, 4 metros, ó 32 pies con corta diferencia; pues pasando de este límite, por mas que se formase el vacío en S en el cuerpo de bomba al levantar el embolo, el agua no podria llegar hasta alli, puesto que la presion ordinaria de la atmósfera no puede elevarla mas que á 10, 4 metros, ó 32 pies de altura. Pero esceptuando este caso, y siempre que llegue el agua sobre la válvula S, pasará sobre el embolo P, y se la podrá hacer subir á la altura que se quiera elevando el embolo que la hace subir.

La bomba llamada impelente se compone de un

tubo ó cuerpo de bomba AB, fig. 27, lleno de agujeritos pequeños en su parte inferior. Este tubo comunica con el canal ACS′, dentro del cual se halla una válvula S′, que se abre para dar paso á todo lo que entre en el tubo OS′, saliendo del cuerpo de bomba AB; y se cierra exactamente por su propio peso, cerrando el paso á todo cuanto quiere salir del tubo OS′ para entrar en el cuerpo de bomba. La base AA de este último se halla siempre sumerjida en el agua á cierta profundidad. Asi es, que cuando se eleva el embolo P, que llena exactamente la capacidad interior de este tubo, el agua se introduce en él por los agujeritos t; y como al bajar el embolo comprime esta agua con mas velocidad que la que puede salir, se ve precisada á entrar una parte en el canal ACS′, levantando la válvula S′, que volviéndose á cerrar inmediatamente la impide bajar al cuerpo de bomba AB; de este modo, á fuerza de alzar y bajar el embolo, entra siempre nueva agua en el cuerpo de bomba, y se eleva sin cesar por el canal ACS′; hasta que al fin puede salir por el orificio O, hecho en este canal á la altura que se quiera.

La tercera especie de bomba está compuesta de un pequeño tubo AH, fig. 28, unido al cuerpo de bomba AB; este comunica con el canal DS′O, dentro del cual hay una válvula S′, que se abre para dar paso á todo lo que salga del tubo AB; y se cierra para impedir que nada vuelva á entrar en él. Hay tambien otra válvula S en la union del tubo pequeño AH con el cuerpo de bomba; esta se abre para dar paso á todo lo que entre en el cuerpo de bomba, y se cierra para impedir que nada salga de él.

Esta tercera especie de bomba se llama compuesta, porque reune los efectos de las dos anteriores. Cuando se levanta el embolo P se forma un vacío debajo de él, como en la bomba absorvente, y el agua y aire del tubo AH entran en el cuerpo de

bomba AB levantando la válvula S; pero luego que se deja de levantar el embolo, la válvula se cierra, é impide que el agua vuelva á bajar al tubo AH. Entonces, bajando el embolo y comprimiendo esta agua, como en la bomba impelente, la obliga á subir toda por el canal DS′O, levantando la válvula S′, que cerrándose por su propio peso, cuando cesa la fuerza que comprima el embolo, impide que el agua del canal DS′O vuelva á entrar en el cuerpo de bomba AB. Elevando entonces de nuevo el embolo vuelve á entrar otra cantidad de agua igual en el cuerpo de bomba, y bajándole pasa al canal DS′O, de suerte, que el agua llega á subir hasta el orificio O, por donde debe salir.

Las ideas que acabamos de esponer harán entender fácilmente lo que vamos á decir sobre el mecanismo de las bombas de aire, llamadas *máquinas neumáticas*. Para hacer subir el agua á los cuerpos de bomba hemos empleado una fuerza esterior, la presion de la atmósfera; para hacer salir el aire de un recipiente cerrado por todas partes nos serviremos de la fuerza interior con que este mismo aire procura dilatarse cuando se le da comunicacion con un espacio vacío.

Supongamos que el recipiente B, fig. 29, de donde queremos estraer el aire ó cualquiera otro gas, tiene una llave R, que se puede abrir ó cerrar segun se quiera, de modo que se dé ó se quite la comunicacion del aire esterior con el interior del recipiente. Unámosle á un cilindro AB, que será un verdadero cuerpo de bomba, por el cual pueda correr un embolo muy justo P por medio de la espiga T. A la estremidad de este cuerpo de bomba, que comunica con el recipiente, pongamos otra llave R′ igual á la primera, trabajada con el mismo esmero, y que pueda igualmente cerrarse ó abrirse segun se quiera, facilitando ó impidiendo la comunicacion del interior del cuerpo de bomba con el aire esterior. Dispuestas las cosas de este modo, y cerrada la llave R,

abramos la otra R′, y bajemos el embolo P hasta AB. El aire contenido en este cilindro saldrá por la llave R; cerremos entonces esta, y abramos la del recipiente. Ahora bien, si levantamos de nuevo el embolo P, se formará un vacío debajo de él, pues está cortada toda comunicacion con el aire esterior; por consiguiente el gas contenido en el recipiente B se dilatará para llenar este vacío, y pasará parte de él al cuerpo de bomba: cerremos entonces la llave R, y esta porcion de gas no podrá volver á entrar en el recipiente. Para arrojarle tambien del cuerpo de bomba, no hay mas que abrir de nuevo la llave R′ y bajar el embolo hasta A B. Hecho esto volveremos á cerrar la llave R′, y nos hallaremos exactamente en la misma posicion que al principio de la esperiencia, con la única, pero importante diferencia, que el recipiente B se verá privado de una parte del gas que contenia. Repitiendo, pues, segunda vez la misma operacion, se estraerá una nueva porcion de este gas; y continuándola un gran número de veces, se deberá estraer casi todo él.

La necesidad de cerrar y abrir sucesivamente las llaves R, R′, hará esta operacion bastante trabajosa; pero hallado de este modo el principio, es muy fácil perfeccionarle. Desde luego podemos reemplazar la llave R′ por una válvula S, colocada en lo interior del embolo P, y ajustada de modo que se abra cuando el aire interior la levante para salir del cuerpo de bomba, y se cierre por su propio peso, ó por la accion de un resortito luego que el aire deje de levantarla, fig. 30. Hecho esto, cuando se quiera empezar la esperiencia, estando cerrada la llave R, se bajará el embolo hasta el fondo del cuerpo de bomba; el aire interior comprimido levantará la válvula S, y habrá salido enteramente cuando el embolo llegue á A B. Entonces, abriendo la llave R, y levantando el embolo, se formará un vacío debajo de él, como en la esperiencia anterior, y el gas contenido en el recipiente B se dilatará para llenarle.

Pero este gas no podrá levantar la válvula S, porque estando dilatado, su fuerza elástica es menor que la presion de la atmósfera, que obra sobre esta misma válvula de fuera á dentro. Asi, cerrando la llave R, y bajando de nuevo el embolo hasta A B, se estraerá todo el gas que se habia esparcido en el cuerpo de bomba; y por una serie de operaciones semejantes, se acabará de estraer casi enteramente el gas que contenia el recipiente.

Mas es preciso eximirnos tambien de la llave R. Para esto se emplean varios medios, uno de los cuales, imaginado por Fortin, y que es el mas generalmente adoptado, es el siguiente. El embolo está atravesado por una varilla de cobre *t t*, por la cual sube y baja con un roce bastante fuerte para no dejar ningun paso al aire, fig. 31. Cuando el embolo baja hácia A B, esta vara con él al principio, llevando en su estremo inferior un tapon *b* que va á aplicarse justamente al orificio *o*, por donde el recipiente comunica con el cuerpo de bomba. Luego que llega á este punto se detiene por la resistencia del plano A B, y el embolo sobrepujando el roce que se le opone, continúa bajando. Ahora bien, cuando se vuelve á levantar el embolo, se lleva consigo la varilla *t t* y el tapon *b*, y la llevaria consigo indefinidamente; pero apenas la ha movido lo necesario para destapar el orificio *o* el otro estremo *t'* de la varilla, encuentra la parte superior A' B' del cuerpo de bomba, y por consiguiente se detiene; entonces el embolo continúa subiendo á pesar del roce á lo largo de la varilla, y el tapon *b* permanece siempre junto al orificio *o* como supusimos al principio. Por medio de esta disposicion se puede dejar abierta la llave R del recipiente todo el tiempo que se haga trabajar la bomba; el orificio *o* estará siempre abierto cuando suba el embolo por el cuerpo de bomba, y cerrado cuando baje; que es precisamente el efecto alternativo que obteniamos cerrando y abriendo sucesivamente la llave R del recipiente.

Terminada esta operacion, se cerrará la llave R, y se quitará el recipiente. Aprovecharemos esta ocasion para hacer observar que en todas las máquinas, de cualquiera naturaleza que sean, es preciso hacer de modo que todos los movimientos secundarios que se repiten á menudo, sean conducidos y dirigidos por el motor principal.

Hemos supuesto hasta aqui que el recipiente en que queriamos hacer el vacío, tenia un cuello estrecho; pero sucede muchas veces que hay que vaciar un espacio bastante ancho para poder introducir en él con comodidad diferentes cuerpos. Para este caso se adapta al cuerpo de bomba un tubo encorvado C, fig. 32, terminado por un plano de vidrio horizontal G G, colocado con mucho esmero, y se situa sobre él una campana R, cuyos bordes estan esmerilados. Si el vidrio está bien colocado y esmerilado, un poco de aceite, ó cualquiera otra sustancia grasa puesta entre él y los bordes de la campana, basta para mantener el contacto, de modo que moviendo el embolo P, se forme el vacío en la capacidad R. Sin embargo, siempre es bueno sujetar la campana al principio de la operacion; pero despues de algunos golpes de embolo, es inútil esta presion, pues basta la de la atmósfera que no se halla contrapesada como antes por el resorte del aire interior. Cuando se quiere esperimentar el efecto del vacío sobre ciertas sustancias, se empieza colocándolas sobre el platillo de vidrio G G, cubriéndolas con la campana R, y haciendo en seguida el vacío. Sin embargo, como puede ser necesario hacer el vacío en recipientes de cuello estrecho, se termina el tubo C por un tornillo V que sobresale un poco del platillo G G, y al cual se unen los recipientes en que se quiere formar el vacío, en vez de aplicarlos inmediatamente al orificio o, como habiamos supuesto.

Es fácil inferir que á medida que se enrarecia el aire interior del recipiente, debe costar mas trabajo levantar el embolo P, puesto que este aire enra-

recido le comprime por debajo con una fuerza mucho menor que la del aire esterior que le comprime por encima; en efecto, se verifica asi en la práctica. Pero por la misma razon, cuando se hace bajar el embolo para arrojar el aire dilatado que ha pasado al cuerpo de bomba, no es necesario emplear ninguna fuerza, bastando para ello el peso de la atmósfera que obra sobre él. Felizmente se ha imaginado un medio de hacer que esta segunda potencia ayude á la otra, haciendo mover á un mismo tiempo, por medio de una rueda dentada, las espigas paralelas de dos embolos, cada uno de los cuales sube mientras el otro baja, fig. 33. Estos dos embolos corresponden á dos cuerpos de bomba que comunican al recipiente en que se forma el vacío; asi dando vueltas á la manija M M para hacer subir uno de ellos, el peso de la atmósfera que conspira á hacer bajar el otro, ayudan con una potencia exactamente igual á la que opone el primero; de suerte que por medio de esta disposicion, por mucho que se alargue la esperiencia, nunca es necesario hacer mas fuerza que la que exige el roce de los embolos con los cuerpos de bomba en que se mueven.

Pero no basta tener un medio de disminuir considerablemente la densidad del aire en un recipiente: es necesario ademas, saber hasta donde llega esta rarefaccion. Para conocerlo se adapta á la máquina un tubo barométrico vacío H H, fig. 34, que comunica por su parte superior con el recipiente, y está sumergido por la parte inferior en un vaso lleno de mercurio. A medida que se forma el vacío en el recipiente, se eleva el mercurio en el tubo H H. Una division vertical hace conocer en cada instante cuanto se ha elevado sobre su nivel, y por consiguiente indica el grado de dilatacion del aire que contiene aun el recipiente. En efecto, la fuerza elástica actual de este aire tiene por medida el esceso de la presion barométrica total, sobre la que indica el barómetro de la máquina, y asi la presion

total dividida por este esceso dará la relacion de las fuerzas elásticas, y por consiguiente la de las dilataciones. Por ejemplo, si el barómetro esterior señala 0,760 metros, y el de la máquina 0,758 metros, la diferencia será 0,002, y la dilatacion del aire esterior se espresará por $\frac{760}{2}$ ó 380, es decir, que si la cantidad de aire que llena todo el recipiente sufriese la presion total de 0,760 metros, ocuparia un volúmen 380 veces menor, y por consiguiente no contendria mas que $\frac{1}{380}$ del recipiente.

Algunas veces en lugar del aparato que acabamos de describir se usa el que representa la fig. 35, que se llama *probeta*, y consiste en un tubo encorvado ABC, lleno en parte de mercurio hervido; uno de sus brazos B A está cerrado, el otro BC está abierto y todo se coloca en el interior del recipiente en que se forma el vacío. Mientras la fuerza elástica del aire que queda es mas que suficiente para sostener una columna de mercurio igual á la diferencia de nivel A H, el brazo A B está lleno; pero si este aire se enrarece, baja el mercurio de este brazo, y el esceso de su nivel sobre el del otro brazo indica por medio de una doble division marcada sobre el instrumento, la medida de la presion que equilibra aun el aire interior. Este instrumento es pues un verdadero barómetro, pero que no puede servir sino para una atmósfera muy dilatada. Cuando se ha observado la diferencia de nivel en los dos brazos de la probeta, se puede calcular fácilmente el grado de dilatacion del aire interior, pues esta diferencia espresa inmediatamente el valor de su fuerza elástica. Asi que, calculando cuantas veces está contenida en la presion barométrica total, se obtendrá la relacion de estas dilataciones. Por ejemplo, si la presion barométrica es 0,760 metros, y la probeta señala solo 0,002 de diferencia, la dilatacion del aire bajo el recipiente será $\frac{760}{2}$ ó 380, como en el caso anterior.

La bomba de aire perfeccionada, como acabamos de decir, se llama *máquina neumática*. Se ha

tratado de calcular la proporcion que sigue en la dilatacion del aire, y considerando la cuestion de un modo abstracto, este cálculo es facilísimo, porque si al primer golpe de embolo saca del recipiente $\frac{1}{10}$ del aire que contiene, es claro que quedarán $\frac{9}{10}$; al segundo sacará igualmente $\frac{1}{10}$ de esta cantidad, y dejará $\frac{9}{10} - \frac{9}{100} = \frac{81}{100}$; al tercer golpe sacará $\frac{1}{10}$ de este aire, ó sean $\frac{81}{1000}$ y dejará $\frac{81}{100} - \frac{81}{1000} = \frac{729}{1000}$, donde se ve que la cantidad que quede será siempre la potencia correspondiente de la fraccion primitiva $\frac{9}{10}$. Disminuyendo asi estos restos sucesivamente parece que deberia llegarse á formar un vacío tal, que la presion indicada por la probeta fuese absolutamente insensible; pero esto no sucede nunca, ni aun con las máquinas mejor construidas, lo cual proviene de varias causas físicas con que no hemos contado al hacer nuestro cálculo. Primeramente es preciso contar con los vapores acuosos que se desenvuelven en el mismo aparato, separándose de las paredes del recipiente y de los cuerpos de bomba á medida que se enrarece el aire; debe añadirse á esto el rozamiento de las válvulas, la fuerza que es preciso que haga el aire dilatado para abrirlas, y su union, que no puede ser perfecta. Todas estas causas son otros tantos obstáculos que limitan el efecto de la máquina, cuando la elasticidad del aire interior llega á no ser suficiente para vencerlas. Por fortuna no nos es necesario jamas obtener un vacío perfecto; pues enrareciendo la máquina el aire hasta un estremo considerable, su barómetro indica la cantidad de aire que no puede estraer, y se perfecciona la esperiencia corrigiendo por medio del cálculo, el error que pudiera resultar.

Se puede probar prácticamente y de un modo muy sencillo, lo que acabamos de decir sobre la dilatacion de los vapores acuosos que se exhalan de las paredes del recipiente y cuerpos de bomba, á proporcion que se estrae de ellos el aire. Para esto basta emplear como recipiente una redoma de cue-

llo estrecho, capaz de atornillarse perfectamente en el platillo de la máquina neumática, y armado de una llave perfectamente trabajada, que pueda abrirse ó cerrarse segun se quiera. Se estrae el aire de esta redoma todo lo posible, y para hacer mas perfecta esta operacion, se multiplican hácia el fin de ella rápidamente los golpes de embolo. Entonces observa la tension interior, que si la bomba es buena, debe ser muy pequeña, como por ejemplo, de uno ó dos milímetros. Se cierra entonces la llave de la redoma, de modo que se intercepte toda comunicacion entre su capacidad interior, y la de los cuerpos de bomba. Se deja el aparato en este estado por algun tiempo, por ejemplo, durante una hora, y despues se vuelve á formar vacío en los cuerpos de bomba, para lo cual bastan unos cuantos golpes de embolo, abriendo la llave del recipiente, cuando se observe por el tubo barométrico que la presion interior es casi nula; al momento se verá bajar el mercurio de este tubo barométrico una cantidad bastante considerable que podrá llegar á 12 ó 15 milímetros, estando la temperatura á 16 o 17 grados. Mas el recipiente no puede haber recibido aire nuevo puesto que ha estado atornillado con la máquina; luego es claro que se ha desenvuelto en su interior una nueva cantidad de fluido elástico que no existia al acabarse de formar el vacío; y este fluido no es otra cosa sino el vapor acuoso desprendido de las paredes del recipiente en el tiempo que ha estado cerrado; vapor cuyo efecto no se notó durante la operacion, porque se le estraía mas rápidamente que él podia dilatarse. La prueba mas segura de que este fluido elástico es realmente el vapor acuoso dilatado, es que no se forma poniendo en el recipiente alguna sal secante como muriato de cal, álcali cáustico &c.; ó para hablar con mas exactitud, el fluido se formará, pero será absorvido por estas sales; de suerte, que teniendo bastante tiempo el recipiente abierto sobre la máquina, por ejemplo, un año entero, se

hallará exactamente la misma tension observada en el primer instante, como he comprobado yo mismo por la esperiencia. Pero para que el recipiente permanezca vacío tan largo tiempo, es preciso que las llaves esten perfectamente trabajadas; y como esta perfeccion es absolutamente indispensable en una multitud de esperiencias, vamos á entrar en algunos pormenores respecto á su construccion.

La idea mas exacta que puede darse de estas piezas y de su uso es la de que son unos conos sólidos, que penetran otro cono hueco, formando con él ángulos rectos. Sea T T, fig. 36, un cilindro metálico sólido, unido herméticamente al cuello del recipiente R. Este cilindro está atravesado en toda su longitud por un canalito estrecho que permite introducir en el recipiente aire, gases ó líquidos, y se trata de interceptar cuando se quiera esta comunicacion. Para esto, se horada en la masa del cilindro T T, perpendicularmente á su longitud, un cono hueco A B A′ B′, y se llena este espacio con otro cono semejante, sólido R′ R′, hecho del mismo metal. Para unir estos dos conos tan perfectamente como es posible, se desgasta el cono sólido R R dentro del cono hueco, haciéndole dar vueltas con rapidez, y poniendo entre ambas piezas un polvo muy duro, llamado *tripoli*, que se elige mas y mas fino á medida que se adelanta el trabajo. Se le pone tambien aceite para facilitar el movimiento de rotacion, y se aprieta continuamente la parte mas ancha del cono R′ R′, hácia la mas estrecha del cono hueco, como si se le quisiese hacer entrar en él. Por medio de esta operacion se llegan á amoldar las dos piezas una con otra con tal exactitud, que se adhieren como si formasen un solo cuerpo seguido, y se puede hacer girar sobre su eje al cono R′ R′ sin que puedan salir ni entrar en el recipiente R, ni líquidos, ni gases, por sutiles que sean. Entonces se saca el cono R′ R′, y se le hace en medio de su longitud y perpendicularmente á ella un canalito *o o*, volviéndole á colo-

car en seguida en su lugar. Haciendo girar este cono sobre sí mismo, unas veces coincide el canalito *o o* con el canal del gran cilindro T T, y entonces se halla libre la comunicacion del interior del recipiente con el esterior, y otras veces el canalito *o o* se halla perpendicular al del gran cilindro, y la comunicacion está interceptada por las partes sólidas del cono R′ R′. Tal es el juego de este aparato de que se hace un uso continuo en las esperiencias de física. Tambien se fabrican estas llaves de vidrio, lo cual es necesario cuando se quieren encerrar en los aparatos sustancias tales, que ya por sí mismas, ya por los vapores que despiden, pudieran corroer los metales, ó combinarse con las soldaduras.

Hemos esplicado antes, fig. 31, de qué modo se consigue abrir y cerrar alternativamente la comunicacion del recipiente con los cuerpos de bomba por medio del tapon *b* que el embolo mismo coloca y lleva consigo en su movimiento; pero este método, aunque bueno, no es el mas seguro que se puede emplear, porque la pequeñez del tapon *b* es un obstáculo para que pueda cerrar exactamente el orificio o, y el menor defecto en esta parte se hará sensible cuando despues de formado el vacío casi enteramente dentro del recipiente, el aire comprimido en los cuerpos de bomba haga esfuerzos para introducirse en él.

Despues de haber esplicado por menor la construccion y uso de la máquina neumática, se entenderá fácilmente el mecanismo de otra especie de bomba que sirve para condensar el aire. Sea R, fig. 37, el recipiente en que se trata de hacer esta condensacion; se le atornilla al cuerpo de bomba A B, dentro del cual se mueve el embolo P, enteramente sólido y construido con una gran exactitud; la comunicacion del recipiente con el cuerpo de bomba se hace por medio del canal S O, terminado en S por una válvula tal, que se levante en la direccion S O para dejar entrar en el recipiente, y se cierre al con-

trario para no permitir que salga nada de él. Por el contrario, hay en S′ otra válvula, que levantada deja entrar el aire esterior en el cuerpo de bomba, y no le permite volver á salir. Esto supuesto, figurémonos el embolo P tocando al fondo A B de la bomba. Si se le hace subir se formará un vacio debajo de él; el aire contenido en el recipiente no podrá llenarle, porque la válvula S le impide salir; pero se llenará con el aire esterior que la válvula S′ deja entrar en el cuerpo de bomba. Bajemos de nuevo el embolo: este aire se hallará comprimido, y no pudiendo salir por la válvula S′ que le cierra el paso, entrará en el recipiente, abriendo la válvula S, que cerrándose en seguida por sí misma, luego que el embolo haya llegado á A B, contendrá este aire impidiendole que vuelva á salir. Entonces volviendo á levantar el embolo, se introducirá en el cuerpo de bomba otra cantidad de aire igual á la primera: pasará de él al recipiente, bajando el embolo, y continuando esta operacion se introducirán en el recipiente tantos volúmenes de aire iguales entre sí, cuantas sean las veces que se haya repetido el movimiento.

Para hacer mas cómodo este aparato, y poder esponer diferentes cuerpos á los efectos de la presion del aire, se le dispone como se ve en la fig. 38. El recipiente es un cilindro de vidrio muy grueso, cerrado por ambas bases con dos planos de cobre M M G G soldados á él, y unidos uno á otro por medio de barras metálicas contenidas con tornillos muy fuertes para que no los separe la fuerza del aire interior. El recipiente comunica con el cuerpo de bomba, por un canal C, y tiene una llave R que sirve para cerrarle luego que se ha condensado el aire dentro de él; últimamente, está rodeado de un enrejado de hierro para evitar las desgracias que pudieran suceder si llegase á reventar por efecto de la condensacion interior. Generalmente se emplean dos cuerpos de bomba, pero es solo para hacer continuo el efecto de la

máquina, porque las presiones ejercidas sobre los dos embolos no pueden aqui contrapesarse, como en la máquina neumática, y siempre es necesaria una fuerza esterior para hacer entrar el aire en el recipiente: fuerza que se hace tanto mas fácil, cuanto mas pequeño es el diámetro de los cuerpos de bomba.

Para juzgar del grado de condensacion se coloca en el recipiente una probeta representada en la fig. 39, y compuesta de un tubo de vidrio encorvado ABC, cuyo brazo AB está cerrado, y BC abierto. El estremo A del primero se halla ocupado por cierto volúmen de aire seco, contenido por una columna de mercurio HB*h*, que vuelve al otro brazo. A medida que se condensa el recipiente, este aire, obrando sobre la superficie del mercurio en *h*, procura hacer subir el líquido por el otro brazo B A; pero el aire contenido en este último resiste á esta fuerza por su elasticidad, y resiste mas y mas al paso que se contrae cuando se aumenta la condensacion; de manera que su volúmen será, segun la ley de Mariotte, recíprocamente proporcional á la presion que sufre. Asi, comparando este volúmen consigo mismo al principiar la esperiencia, y despues de haber dado cierto número de golpes de embolo, se puede calcular fácilmente la condensacion que se ha dado al aire interior.

Pueden hacerse una infinidad de esperiencias instructivas con los instrumentos y máquinas que acabamos de describir. Por ejemplo, si se colocan animales vivos debajo del recipiente de la máquina neumática, y se forma en él el vacío, se les ve agitarse y morir inmediatamente, lo cual prueba que el aire que respiran es necesario á su existencia. Aun se observa en ellos otro efecto de esta falta del aire: todas las sustancias aeriformes contenidas en el interior de sus cuerpos, cuyo resorte estaba balanceado por la presion del aire esterior, hallándose libres de esta presion se dilatan y rompen los vasos que los

contenian. Esta dilatacion escesiva hace tambien sensible á la vista la capita de aire que se adhiere á casi todos los cuerpos formando como una cubierta; porque poniendo en un vaso lleno de agua pedazos de vidrio ó de metal, arena, plumas ó cualquiera otra cosa, y colocándole debajo de la máquina neumática, luego que se empieza á estraer el aire que obra sobre la superficie del agua, se ven cubrirse las superficies de todos los cuerpos sumergidos en este líquido de una infinidad de ampollitas de aire, que se separan de ellos á proporcion que se hace el vacío, y que vienen á reventar á la superficie del líquido. El agua misma origina iguales ampollitas, producidas por cierta cantidad de aire que puede absorver, y que se oculta á nuestra vista, mientras está combinado con su sustancia; pero que puede perder, como acabamos de decir, descargándola del peso del aire esterior, del mismo modo que se hace aumentando su fuerza elástica por medio del calor. Ademas, si se coloca de este modo bajo el recipiente de la máquina neumática agua á la temperatura de 20 ó 30 grados, se la ve hervir luego que se han dado algunos golpes de embolo; siendo esta temperatura muy inferior á la que determina la ebullicion bajo la presion ordinaria de la atmósfera. Esto concuerda con lo que hemos visto anteriormente, á saber, que la temperatura de la ebullicion del agua disminuye del mismo modo que la presion atmosférica; pero aqui no hacemos mas que indicar el fenómeno, cuyas leyes conoceremos despues.

Cuando las sustancias que se colocan asi en la máquina producen vapores, es preciso tener cuidado de que estos no sean de tal naturaleza que alterèn los embolos de la bomba, corroyendo las materias de que estan formados. Para introducir en el vacío semejantes sustancias, es preciso emplear un instrumento llamado manómetro, que describiremos en otra parte.

La máquina neumática puede servir tambien

para probar la igualdad de caida de todos los cuerpos en el vacío, como hemos indicado en la página 61.

En fin, pueden producirse otros muchos fenómenos curiosos disponiendo el aire en aparatos cerrados, de modo que se aumente su resorte por la condensacion, ó por la disminucion de la presion esterior. Este resorte se emplea para elevar el agua por tubos, ó hacerla salir en surtidores. Estos son juegos de física que se entenderán fácilmente con los que hemos dicho, en el momento que se vean sus aparatos.

Pero una de las aplicaciones mas útiles de la máquina neumática, es el medio que nos ofrece de pesar el aire y los gases. Aqui solo trataremos del aire atmosférico. Supongamos que se toma una esfera de vidrio, armada de una llave trabajada con esmero, y que se pesa estando abierta y al aire libre. El peso P que se halle, será igual al peso de la cubierta de vidrio, menos el peso del aire que desaloja esta cubierta; hágase el vacío en la esfera, y vuélvase á pesar en este estado; el peso que nuevamente resulte P′ será igual al de la misma cubierta, menos el peso del volúmen total de aire que desaloja que es mayor que la primera vez, en una cantidad igual á la capacidad interior. Por consiguiente si la temperatura y la presion atmosférica son exactamente las mismas en ambas esperiencias, y se ha hecho el vacío con la mayor perfeccion que sea posible, no habrá mas que restar del primer peso P, el segundo P′, y su diferencia será el peso del aire que contenia la esfera, en las circunstancias en que se ha hecho la operacion. De este modo se halla que á la temperatura del hielo al derretirse, y bajo la presion de 0,76 metros, un litro de aire atmosférico seco, pesa 1.3 gramos; pero aunque este resultado es muy exacto, como veremos despues, no le damos aqui sino como una aproximacion que se obtendria por el método que acabamos de describir; pues muy rara vez suce-

derá que se pueda hacer la operacion precisamente en las circunstancias que hemos indicado. Aun será mas raro que la temperatura y la presion permanezcan enteramente constantes todo el tiempo que duren las esperiencias; y en fin, porque hace variar este peso el vapor acuoso que se halla mezclado siempre con el aire, en una cantidad mas ó menos considerable. Es necesario saber calcular la influencia de todas estas causas, y corregir sus efectos para poder reducir todas las operaciones á un mismo término, tal como el que acabamos de indicar; pero aunque nos faltan que adquirir aun muchos conocimientos antes de llegar á este punto, hemos juzgado conveniente espresar desde luego la aproximacion anterior de peso del aire, porque este conocimiento aproximado nos bastará por ahora para dar la mayor exactitud á muchos resultados útiles que vamos á describir.

CAPITULO IX.

Medida de la dilatacion de los cuerpos sólidos.

Habiendo arreglado completamente la marcha del termómetro, y dado á este instrumento toda la exactitud necesaria para que sea perfectamente comparable consigo mismo en todas sus indicaciones, vamos á servirnos de él para fijar con exactitud la estension de los movimientos que las variaciones del calor pueden producir en los cuerpos; porque habiendo reconocido que todos los cuerpos se dilatan al crecer su temperatura, y se contraen al disminuir, es evidente que estas mudanzas de dimensiones deben hacer variar su masa, y por consiguiente su peso en un volúmen dado. Y como en casi todas las esperiencias físicas ó químicas que hacemos sobre los cuerpos, uno de los elementos que mas nos importa conocer es la proporcion de su masa en un volúmen dado, se sigue que debemos medir las variacio-

nes aparentes producidas por el calor, antes de tratar de estudiar la influencia de las demas causas que pueden obrar sobre ellos.

Primeramente nos ocuparemos de la dilatacion de los cuerpos sólidos; siendo natural empezar por ellos, puesto que forman la materia de todos los vasos, y de la mayor parte de los instrumentos que empleamos. Al pronto parece que esta determinacion no presenta ninguna dificultad: formar con el cuerpo que se quiere esperimentar una barra de un tamaño conocido, esponerla sucesivamente á dos temperaturas diferentes, y medir su longitud en ambos estados, he aqui á lo que se reduce todo el examen de su dilatacion; pero esta operacion, que parece tan sencilla, es mucho mas dificil de lo que se cree, si se ha de ejecutar con exactitud.

Las dilataciones de los cuerpos sólidos son muy pequeñas generalmente, y por lo mismo es preciso emplear medios muy justos para medirlas con exactitud. El primero que se presenta á la imaginacion es el de aumentar los efectos de la dilatacion por medio de palancas y ruedas dentadas que obren unas sobre otras. Es cierto que matemáticamente hablando, las menores alteraciones de longitud pueden multiplicarse de este modo indefinidamente, de modo que se hagan sensibles al observador menos escrupuloso; pero si es fácil probar asi que los cuerpos se dilatan con el calor, no lo es el medir exactamente la estension de este aumento; y las causas de error se multiplican á proporcion que es mayor el número de palancas ó ruedas; pues cualquiera que sea la perfeccion con que esten construidas y unidas estas piezas, la máquina estará tanto mas espuesta á irregularidades cuanto mas complicada sea. Ademas (y este es uno de los mayores obstáculos que hay que vencer), será muy dificil que estas piezas, que han de estar en comunicacion, y aun en contacto con la barra que se calienta, no participen mas ó menos de sus alteraciones de temperatura. He aqui

pues, una nueva causa de variacion que descuidada nos espondria á grandes errores, y que es casi imposible apreciar por poco complicada que sea la máquina. Asi es que todos los instrumentos de este género que se hallan en los gabinetes de física, llamados *pirómetros*, sirven muy bien para probar la dilatacion de los cuerpos sólidos por el calor, pero no para medirla exactamente, que es en realidad la cuestion importante, pues los efectos de la dilatacion se manifiestan diariamente á nuestros ojos por un número tan grande de fenómenos, que no hay necesidad de inventar una máquina para demostrar su existencia.

Limitémonos, pues, á la forma del aparato que parece mas sencilla. La barra metálica B B′, fig. 40, se apoyará por uno de sus estremos al punto fijo F F, y por el otro empujará el estremo L de una palanca doblada L C L′, movible al rededor del centro fijo C, y cuyo brazo C L′ sea mucho mayor que C L, por ejemplo en razon de 100 á 1. Coloquemos al estremo del brazo C L′ una division circular D D. Asi, si la barra se dilata una cantidad cualquiera, por ejemplo un milímetro, hará mover esta cantidad el estremo L de la palanca, y por consiguiente el estremo L′ se moverá 100 milímetros ó un decímetro sobre la division. En general, el movimiento causado por la barra será cien veces mayor en el estremo L′, y si se puede observar sobre la division un movimiento de la aguja, igual á medio milímetro, lo cual es muy fácil, esta cantidad corresponderá en el estremo L á un movimiento de $\frac{1}{200}$ de milímetro, ó $\frac{1}{450}$ de línea, que será lo que se haya dilatado la barra.

Tales son, poco mas ó menos, los pirómetros que emplea Mr. Brongniart en la fábrica de porcelana de Sevres, para determinar los términos fijos en las temperaturas elevadas de sus hornos. En efecto, es evidente que si un mismo pirómetro está espuesto al calor del mismo modo y al mismo grado, la

aguja L′ se colocará en la misma division, siempre que sea la misma la dilatabilidad de la barra BB′ y no se altere la construccion del aparato.

Pero si esta máquina, empleada como acabamos de decir, es muy útil para indicar términos constantes de temperatura, no sirve, á lo menos sin alguna modificacion, para medir las dilataciones absolutas de los cuerpos. En efecto, para que el estremo L′ de la aguja indique en realidad la dilatacion absoluta de la barra B B′ es necesario que el punto céntrico C y el obstáculo F esten perfectamente fijos, ó á lo menos que su distancia sea rigorosamente invariable en todas las temperaturas que pueda tener la barra. ¿Y cómo es posible satisfacer á esta condicion? Si el punto C y el obstáculo F hacen parte de un mismo cuerpo, cualquiera que sea la materia de este, siempre que pueda participar de la temperatura de la barra se dilatará y contraerá al mismo tiempo que ella, aunque en diferentes proporciones, y por consiguiente la dilatacion indicada por la aguja L′ no será la de la barra BB′, sino solo el esceso de la dilatacion de esta barra sobre la de aquel cuerpo.

El medio mas sencillo, y acaso el único que se puede usar para evitar este inconveniente, es el hacer de modo que las variaciones de temperatura, aun cuando obren sobre el punto C y el obstáculo F, no puedan separarlos una cantidad sensible en la direccion CF. Esto se conseguirá, por ejemplo, siendo el obstáculo G un vidrio exactamente plano, perpendicular á la longitud de la barra BB′, y el punto C determinado por un largo cilindro tambien perpendicular á dicha longitud; añadiendo la circunstancia de que uno y otro esten sostenidos sobre cuerpos bastante distantes de la barra y macizos, de modo que no participen de las variaciones de temperatura que aquella pueda sufrir. Tal es, con corta diferencia, la condicion fundamental del aparato empleado por MM. Lavoisier y Laplace. Su bar-

ra BB′, fig. 41, está horizontal, y sostenida en esta posicion por cilindros de vidrio, sobre los cuales puede correr libremente; el obstáculo FF es tambien una regla de vidrio vertical, fija perpendicularmente á otra regla horizontal TT, cuyos estremos estan asegurados en dos enormes pilares de piedra metidos en el suelo á una gran distancia de la barra calentada; el brazo pequeño CL es tambien vertical, y el eje de rotacion C, apoyado igualmente sobre otros dos pilares de piedra, no puede ser modificado por las variaciones de temperatura que se hagan sufrir á la barra; pero el estremo del brazo largo CL, en lugar de moverse sobre una division, hace mover un anteojo, dirijido á una mira colocada á gran distancia. Se ve, pues, que este aparato está enteramente exento de los errores nacidos de la dislocacion de los puntos que se suponen fijos en los otros pirómetros.

Pero aun no basta esto, pues para que las observaciones sean exactas, es preciso que la barra tenga una temperatura conocida y uniforme en toda su longitud. El único medio de conseguirlo es sumerjirla en un fluido, cuyas partes se hallen todas á esta misma temperatura. Pero para esto es necesario que la barra esté horizontal, pues hemos visto ya que sumerjiendo el termómetro en un vaso lleno de líquido á diferentes profundidades, se encuentra que tienen diferentes temperaturas las distintas capas líquidas; de donde resulta, que una barra sólida, sumerjida verticalmente en un fluido que se haya calentado, tiene diferente temperatura en sus diversos puntos; lo cual hace muy dificil la valuacion de su temperatura media. Este inconveniente se evita sumerjiendo la barra horizontalmente, porque en un líquido no agitado, la temperatura es constante en toda la estension de una misma capa horizontal. En fin, para que los termómetros colocados cerca de la barra indiquen inmediatamente su temperatura es necesario, como hemos visto tratando del termóme-

tro, que esten rodeados de líquido en toda la estension ocupada por la columna de mercurio; para lo cual es preciso que esten tendidos horizontal, ó casi horizontalmente á lo largo de la barra. Tambien se podria tenerlos en una posicion vertical, calculando la diferencia de dilatacion de la parte que se halla fuera del líquido; pero esto seria menos cómodo, y acaso menos exacto. Por medio de estos procedimientos han obtenido MM. Lavoisier y Laplace los resultados contenidos en la tabla siguiente.

Nombres de las sustancias por órden alfabético.	Dilatacion de una regla, cuya longitud es 1, á la temperatura del hielo al derretirse. De 0.° á 100.°	Por cada grado centesimal.
Acero sin templar. . . .	0,00107915	$\frac{1}{92664}$
Acero amarillo templado, cocido á 65 grados.	0,00123956	$\frac{1}{80574}$
Arambre de hierro. . .	0,00123504	$\frac{1}{81157}$
Cobre	0,00171735	$\frac{1}{58231}$
Cobre amarillo ó laton.	0,00187821	$\frac{1}{53215}$
Estaño de la India ó de Melac.	0,00193765	$\frac{1}{51609}$
Estaño de Falmouth. . .	0,00217298	$\frac{1}{46161}$
Flint-glass inglés.	0,00081166	$\frac{1}{124834}$
Hierro forjado.	0,00122045	$\frac{1}{81937}$
Mercurio.	0,00615915	$\frac{1}{16236}$
Oro refinado.	0,00146606	$\frac{1}{68202}$
Oro de ley de París recocido.	0,00151361	$\frac{1}{66067}$
Oro de ley de París sin recocer.	0,00155155	$\frac{1}{64452}$
Plata copelada.	0,00190974	$\frac{1}{52363}$
Plata de ley de París. .	0,00190868	$\frac{1}{52392}$
Platina (segun Borda).	0,00085655	$\frac{1}{116748}$
Plomo.	0,00284836	$\frac{1}{35108}$
Vidrio de Francia con plomo.	0,00087199	$\frac{1}{114680}$
Vidrio sin plomo (en tubo).	0,00087572	$\frac{1}{114191}$
Vidrio de Saint-Gobin (luna de espejo). . .	0,00089089	$\frac{1}{112247}$

Exámen de diferentes cuestiones, dependientes de la dilatacion de los cuerpos sólidos.

El conocimiento de la dilatacion de los cuerpos sólidos, y en particular de los metales, es sumamente útil en una infinidad de circunstancias correspondientes á las ciencias y artes. Hemos indicado ya algunas de estas últimas, porque se presentan mas fácilmente á la vista; y ahora, que hemos llegado á obtener resultados mas exactos, podemos entrar en aplicaciones mas sutiles y delicadas.

Por ejemplo, siempre que un físico quiere hacer esperiencias sobre líquidos ó gases, es preciso que los contenga en vasos de vidrio ó de metal; y esponiendo estos vasos sucesivamente á diferentes temperaturas, se estiende ó se estrecha la materia de que estan formadas; y como que estas variaciones son simultáneas en las tres dimensiones del cuerpo, resulta que aumenta ó disminuye el volúmen del vaso; de suerte, que es preciso contar con estos efectos, y correjirlos por medio del cálculo para poder juzgar aisladamente de lo que ha sucedido al líquido ó gas contenido en el aparato. Esto es muy fácil conociendo la dilatacion del vaso en una de sus dimensiones, porque se demuestra por medio del cálculo que *la dilatacion cúbica, cuando es muy pequeña, es triple de la dilatacion lineal respecto á unas mismas variaciones de temperatura*, es decir, que si una regla se alarga ó acorta, por ejemplo $\frac{1}{1000}$ de su longitud, el volúmen de esta regla, ó de cualquiera otro cuerpo compuesto de la misma materia, variará $\frac{3}{1000}$ en las mismas circunstancias.

En los cuerpos sólidos, mientras la temperatura está comprendida entre la del hielo al derretirse y la del agua hirviendo, la dilatacion lineal parece proporcionada al número de grados del termómetro contados desde 0; luego sucederá lo mismo respecto al volúmen. Segun esto, conociendo el volúmen de

un cuerpo á o.° y la dilatacion cúbica de la sustancia que le compone, se hallará fácilmente el volúmen de este cuerpo á cualquiera otra temperatura; y recíprocamente dado el volúmen á una temperatura cualquiera, se calculará el que debe tener á o.° Por ejemplo, la dilatacion cúbica del mercurio es $\frac{1}{5412}$ por cada grado; luego un volúmen de mercurio que sea de 3 centímetros cúbicos á o.°, será de $3+\frac{3}{5412}$ á 1.°, de $3+\frac{6}{5412}$ á 2.°, de $3+\frac{9}{5412}$ á 3.°; y asi sucesivamente en el término en que la dilatacion puede mirarse como constante.

La medida de la dilatacion de los metales es utilísima para valuar en ciertos casos las mudanzas que sufren en sus dimensiones los instrumentos de astronomía; y para referir á una misma temperatura las reglas de metal destinadas á medir bases en las operaciones geodésicas. En fin, se emplea tambien para correjir las variaciones de longitud que pueden sufrir las alteraciones de los relojes de péndola; y como esta aplicacion última es muy importante la esplicaremos algo mas detenidamente.

En estos instrumentos se comunica y arregla el movimiento por un péndulo compuesto de una vara metálica, terminada en la parte inferior por una lenteja muy pesada, igualmente de metal. Este aparato, suspendido por el estremo libre de la varilla, oscila á un lado y á otro de la vertical, y hace dar un paso al minutero del relox por cada una de sus oscilaciones. Sea la que quiera su forma, y las materias de que está compuesto, siempre se puede comparar su movimiento al de un punto material pesado, suspenso en el estremo inferior de un hilo inflexible y sin masa. Este aparato ideal se llama péndulo simple: cada péndulo real y compuesto se refiere á un péndulo simple que marchase exactamente como él; y la duracion de las oscilacionss de diferentes péndulos compuestos, cualesquiera que sean sus formas, son entre si como las raices cuadradas de las longitudes de sus péndulos simples. Si se to-

ma, pues, sobre cada uno de ellos, empezando á contar desde el punto de suspension, una distancia igual á aquella longitud, el estremo de esta distancia marcará la posicion del punto pesado, que podria sustituirse á toda la masa del péndulo compuesto; y este punto es el que se llama *centro de oscilacion*. Segun esto, es fácil concebir que las variaciones de temperatura, alterando la configuracion y longitud del péndulo compuesto, deben cambiar tambien la posicion de este centro, y por consiguiente la duracion de las oscilaciones.

En efecto, si la temperatura se eleva, la varilla metálica se alarga, y baja el centro comun de oscilacion de esta varilla y la lenteja; el péndulo simple correspondiente se hace mas largo y las oscilaciones mas lentas. Por el contrario, si baja la temperatura, el centro de oscilacion se acerca al punto de suspension y las oscilaciones se aceleran. De aqui nacerian contínuas variaciones en la marcha del relox si no se hubiese hallado el medio de correjir este inconveniente. Esto se consigue por medio de diferentes mecanismos aplicados á la varilla del péndulo, reducidos todos en último resultado á hacer subir mas arriba una parte del peso del sistema cuando se alarga la varilla, y á hacerla bajar cuando se acorta; de suerte, que estos efectos contrarios se compensan exactamente. Estas piezas se llaman *compensadores*.

El mas usado es el que representa la fi. 42, ABCD; es un bastidor de hierro, suspendido por una varilla tambien de hierro del punto S: la varilla del relox, designada por TL, es de hierro igualmente; pero no está unida inmediatamente á este bastidor, sino que lo está en el punto T á otro bastidor mas pequeño abcd, formado por varillas de cobre que descansan en cd sobre el bastidor grande, y estan en estos puntos unidas á él. Para concebir el efecto de este aparato es preciso tener presente que el cobre se dilata mas que el hierro á la misma tempe-

ratura; y que las cantidades de sus dilataciones, respecto á longitudes iguales, son con corta diferencia como 5 á 3. Esto supuesto, si se eleva la temperatura, el bastidor de hierro ABCD y la varilla de hierro SF se han de dilatar, asi como la varilla de hierro TL que lleva la lenteja; pero al mismo tiempo las reglas abcd del bastidor de cobre se dilatan una cantidad mayor que las varillas de hierro ACBD. En virtud, pues, de este esceso de dilatacion harán subir el punto de suspension T mas de lo que le ha hecho bajar la dilatacion del bastidor de hierro, y compensarán en todo ó en parte la dilatacion total de las piezas de hierro del aparato.

Sujetando al cálculo esta disposicion, se halla que no es posible obtener la compensacion con un todo compuesto de dos bastidores, lo cual proviene de que no hay bastante diferencia en la dilatacion de los dos metales empleados; pero se puede conseguir multiplicándolos y combinándolos de modo que sus efectos obren unidos. Para esto supongamos que el bastidor de cobre abcd no sostiene inmediatamente de la varilla TL del relox, sino otro bastidor A′B′C′D′, fig. 43, compuesto como ABCD, es decir, que los dos montantes A′C′ y B′D′ sean de hierro, y el travesaño inferior sostenga otro bastidor a′b′c′d′, cuyos montantes sean de hierro, al cual esté unida la varilla TL, y calculemos el punto de suspension. Es evidente que los movimientos de compensacion que obren sobre este centro serán mas considerables. Asi se hace posible su inmovilidad, bastando para obtenerla que la suma de todas las varillas de cobre empleadas en el aparato sea triple de la distancia del centro de gravedad de la lenteja con respecto al eje de suspension S. Se puede, pues, por medio de esta regla sencillísima, variar segun se quiera la longitud y número de las reglas del modo que parezca mas cómodo. Ordinariamente los relojeros se limitan á emplear cuatro bastidores, como hemos supuesto en la figura.

He visto emplear con muy buen éxito á un relojero llamado Martin para los relojes de péndola un compensador aun mas sencillo, que esplicaré con tanto mas gusto, cuanto que es precisamente el mismo mecanismo que sirve para la compensacion de los relojes llamados *cronómetros* ó *guarda-tiempos*, porque deben andar con una perfecta regularidad. Concibamos dos láminas metálicas ABCD, fig. 44, de igual longitud, una de hierro y otra de cobre, colocadas una sobre otra, y aseguradas asi de un modo invariable por medio de un gran número de tornillitos que las atraviesen en otros tantos puntos de su longitud. Figurémonos que la operacion se ha hecho á la temperatura de 10 grados; entonces el sistema de las dos láminas será rectilíneo; pero si la temperatura varía esta rectitud dejará de existir. Si el calor se aumenta las dos láminas se dilatarán, pero mas la de cobre que la de hierro, y entonces el sistema se encorvará del modo que representa la fig. 45, quedando la lámina de hierro dentro de la concavidad, y fuera la de cobre para compensar el aumento de su dilatacion. Lo contrario sucederá si se disminuye la temperatura mas de los 10 grados que hemos supuesto como término, y el sistema se encorvará en sentido opuesto, quedando el cobre que está mas contraido dentro de la concavidad y el hierro á la parte de afuera, fig. 46. Para aplicar esto á la compensacion de un relox, fig. 47, fijemos en un punto cualquiera O de su varilla SL un sistema semejante de láminas, perpendicular á su direccion, y terminado en sus estremos por las masas MM, capaces de separarse ó acercarse á la varilla SL, atornillándose sobre dos roscas VV. Supongamos ahora que estas láminas estan rectilíneas á cierta temperatura, por ejemplo, á diez grados, entonces formarán una parte del péndulo compuesto que conduce el movimiento del relox. Pero si la temperatura varía se encorvarán y harán subir ó bajar á las masas. Por ejemplo, si sube la temperatura, la

varilla SL se alargará, y bajará el punto L, como tambien el punto O; pero al mismo tiempo se encorvarán las dos láminas, y habiendo colocado encima la de hierro tomarán la forma de la fig. 48; de modo, que harán subir las dos masas MM; lo cual neutralizará el efecto de la prolongacion de la varilla. Por el contrario, si la temperatura disminuye mas allá del término en que el sistema está rectilíneo, la varilla SL se contraerá y hará subir la lenteja L, asi como el punto O; pero encorvándose las láminas, como representa la figura 49, harán bajar las masas MM, y se destruirán ambos efectos. Segun la dilatacion de los metales, que es conocida, se calculan las dimensiones de las diferentes partes del aparato, de manera que la compensacion sea casi exacta; y se la acaba de hacer tal comparando la marcha de la péndola con la de las estrellas, y acercando ó separando de la varilla SL las masas MM, hasta que las variaciones de temperatura no alteren absolutamente el movimiento. Para hacer esta prueba en poco tiempo del modo mas seguro se calienta el interior de la caja del relox con carbon encendido; y se arreglan las masas de forma que el relox ande lo mismo á estas temperaturas elevadas y al grado de calor á que se halla entonces la atmósfera. De este modo se arreglan tambien los otros géneros de compensadores. El que acabamos de describir tiene la ventaja de poderse aplicar casi sin gasto ninguno á todos los relojes de péndola, y puedo asegurar por esperiencia que es muy exacto.

Un compensador de esta especie se aplica, como acabamos de decir, á los cronómetros para hacerlos insensibles á las variaciones de la temperatura. No hay nadie que ignore que el regulador del movimiento de todos los relojes de faltriquera es un balancin BC, fig. 50, movido por un resorte espiral S, que plegándose y desplegándose alternativamente comunica el mismo movimiento alternativo al balancin, y produce el golpe del relox. Mas variando la

temperatura variarán las dimensiones del balancin y del resorte y la fuerza elástica de este; lo cual alterará la duracion de las vibraciones. Para destruir este inconveniente se fijan en el balancin dos láminas compensatrices CM, CM, construidas de cobre y hierro, como acabamos de decir; pero arqueadas desde luego, á fin de no aumentar de un modo desmesurado el sitio que ocupa en la caja el balancin. Los estremos libres de estas láminas estan terminados igualmente por tornillitos, en que se enroscan unas masitas de oro que pueden acercarse ó separarse del punto C en que estan unidas al balancin. Ahora bien, la curvatura de las láminas compensatrices variará cuando varíe la temperatura, y harán acercar ó separar las masitas MM del centro de rotacion O. En el primer caso, obrando estas sobre el centro de rotacion por medio de una palanca más corta será necesaria menos fuerza en el resorte para moverlas; y al contrario en el segundo; pues obrando por medio de una palanca mas larga, para que sea la misma su rotacion se necesitará mayor esfuerzo de parte del resorte. Se podran, pues, disponer las láminas de modo que las variaciones de estas fuerzas correspondan á la que sufre el resorte por efecto de los cambios de temperatura; entonces la marcha del relox será mas regular, y lo será enteramente á fuerza de ensayos, colocándole sucesivamente en temperaturas artificiales, próximas á la del hielo y á la del agua hirviendo, y acercando ó separando las masitas de oro de las láminas compensatrices, hasta que la marcha del relox, comparada con la de las estrellas, ó con la de una buena péndola, no sufra absolutamente ninguna variacion.

Mr. Breguet ha hecho uso de las láminas compensatrices para construir termómetros de una prodigiosa sensibilidad. Se componen de tres capas metálicas de plata, oro y platina, unidas entre sí por medio de la presion á una temperatura elevada, y pasadas despues por el cilindro, hasta reducirlas al

grueso de $\frac{1}{100}$ de línea. En seguida se arrolla este sistema en forma de espira, y se fija asi por medio de una moderada cochura. Entonces se une por su parte superior á un punto fijo, y se pone en el inferior una aguja metálica horizontal que sirva de índice, fig. 51. Colocado este aparato al aire de una temperatura constante, toman las láminas sobrepuestas la curvatura que les conviene; pero por poco que varíe la temperatura, las espiras se enroscarán ó desenroscarán, é inmediatamente se moverá el índice. Si se comparán estos movimientos con las variaciones de temperatura observadas en un buen termómetro, se deducirá la marcha del instrumento; y cuando esté arreglado, será muy á propósito para indicar las menores variaciones repentinas de temperatura, á causa de su gran superficie y poca masa. Por ejemplo, poniéndole debajo del recipiente de la máquina neumática, y haciendo el vacío con rapidez, se le verá caminar hácia el frio, é indicar un descenso de temperatura de quince ó veinte grados; y luego que se restablezca el equilibrio de temperatura, volverá inmediatamente á su estado primitivo. Déseles entonces comunicacion con el aire esterior, y el índice señalará una elevacion de temperatura tan repentina como fue el descenso, é igual á él. Este calor es el que se desprende del gas enrarecido que ha quedado en el interior del recipiente, y que se condensa por el aire que se precipita en él.

Habiendo hablado de todas las especies de compensaciones, no debemos olvidar la observacion de que con respecto á las péndolas de relojes, se pueden suplir estas compensaciones, formando su varilla con madera que se haya secado al horno, pintada al oleo y varnizada. De este modo parece que son casi insensibles las dilataciones causadas por el cambio de temperatura.

CAPITULO X.

Medida de la dilatacion de los gases por el calor.

Las esperiencias de MM. Lavoisier y Laplace, sobre la dilatacion de los cuerpos sólidos, nos han hecho conocer que entre los términos del hielo al derretirse, y del agua hirviendo, la dilatacion de los metales sólidos es sensiblemente proporcional á la del mercurio. La misma proporcionalidad existe tambien entre las dilataciones del mercurio y las de los gases secos. Este importante resultado lo ha establecido con toda precision. Mr. Gay-Lussac.

Para medir exactamente la dilatacion de las sustancias gaseosas, es necesario introducir una cantidad conocida de ellas en tubos graduados con mucha exactitud en partes de igual capacidad, y terminados por una bola, cuyo volúmen sea bastante considerable, con respecto al diámetro del tubo. En seguida es preciso contenerlos allí bajo una presion conocida, esponerlos á diferentes temperaturas, y observar las cantidades que se dilatan ó contraen en estas diversas variaciones; en una palabra, es menester construir un verdadero termómetro de gas; operacion que para ser exacta exige muchas precauciones indispensables.

Desde luego para graduar los tubos, se hace uso del método inventado por Mr. Gay-Lussac, que he esplicado en el tratado general hablando de los termómetros. Para conocer la capacidad de la bola y la del tubo, se llenan uno y otro sucesivamente de mercurio, y se determina por medio de la balanza el esceso de peso que adquieren, porque se sabe, como veremos mas adelante, que un milímetro cúbico de mercurio pesa 13,59719 milígramos. Despues es necesario que los tubos esten perfectamente secos antes de encerrar en ellos el gas, porque ya hemos dicho que los tubos de vidrio que han estado abiertos

y espuestos á la atmósfera, se cubren por la parte interior de una capita de agua imperceptible, que el calor hace separar, reduciéndola á vapor. Si no se empieza estrayendo esta capita de agua, el vapor que se forme de ella segun las diversas temperaturas, se mezclará con el gas introducido en el tubo, y aumentará su volúmen; y como la cantidad de vapores formados de este modo crecerá con la temperatura, hasta que se haya estinguido completamente la capita de agua, es claro que esta causa estraña aumentará continuamente la dilatacion propia del gas á medida que se eleve la temperatura; error en que han incurrido algunos físicos.

El único medio de evitar este inconveniente, es el de estraer ante todo, esta capita de agua, calentando el tubo hasta reducirlo á vapor; y á fin de que el aire no la vuelva á introducir, es necesario llenar el tubo de mercurio y hacerle hervir como para formar un termómetro; con lo cual sea que esta ebullicion haga salir toda el agua ó no, siempre será cierto que si queda alguna, no podrá exhalarse nada de ella mientras el tubo esté espuesto á temperaturas mas bajas que la que determina la ebullicion del mercurio. Esta es la primera precaucion que ha tomado Mr. Gay-Lussac.

En seguida, para no introducir en sus tubos sino aire ó gases secos, suelda á su estremo abierto otro tubo mas ancho T T, fig. 52, que puede mirarse como una especie de recipiente destinado á contener el gas. Parte de este tubo está lleno de pedazos de muriate de cal, ó de cualquiera otra sal capaz de absorver la humedad. Tambien se debe suponer que se forma en él el vacío para introducir el gas sin que se mezcle con el aire. Para introducir una parte de él en el tubo T G, Mr. Gay-Lussac se vale de un alambre de hierro muy fino, introducido con anterioridad en el tubo; inclina este ó le vuelve enteramente, y hace salir una parte de mercurio, que es reemplazado por un volúmen de aire G G, fig. 53.

Con estas y otras precauciones se llega á no tener en el tubo mas que una pequeña columna de mercurio M, que sirve de embolo; y todo el espacio G G, comprendido desde este punto á la bola del tubo, está lleno del gas seco que se ha introducido en él. Si se trata del aire atmosférico, no hay necesidad de hacer el vacío en el recipiente TT, bastando dejar por algun tiempo las sales en él, despues de lo cual se le introduce en el tubo T G como hemos dicho.

Introducido el gas, solo resta hacerle sufrir sucesivamente diferentes temperaturas conocidas, para lo cual emplea Mr. Gay-Lussac un vaso metálico A B, fig. 53, en forma de paralelipípedo, cuyo fondo está colocado sobre un horno del mismo tamaño. Se pone agua en este vaso, y se la calienta á diferentes grados: un termómetro V, sumergido en ella verticalmente, y cuyo tubo sale fuera de la cobertera del vaso, sirve para indicar su temperatura con corta diferencia, y hacer conocer si se debe aumentar ó disminuir el fuego.

Mas es preciso que el tubo T G que contiene el gas no esté sumergido en el agua de este modo; porque ya hemos hecho observar por esperiencia que las diferentes capas horizontales de un líquido que se calienta por abajo no tienen los mismos grados de temperatura. Asi, para poder conocer exactamente la que obra sobre el gas, es necesario colocar el tubo que le contiene en una situacion horizontal como representa la figura, y entonces su temperatura podrá conocerse exactamente por medio de un buen termómetro *t t*, colocado enfrente del tubo y horizontalmente, de modo que se halle en la misma capa líquida que aquel.

Pero hemos dicho que el vaso era metálico. ¿Cómo, pues, podrán observarse los grados del termómetro *t t*, y el punto variable G á que se halla cada instante el volúmen del gas en el tubo graduado que le contiene? Este punto G y el tubo *t* del termómetro, no se pueden tener continuamente fuera

del agua caliente, porque no hallándose estas partes á la misma temperatura del baño, causaria errores en la observacion; pero se pueden sin inconveniente sacar de tiempo en tiempo los tubos durante el corto intervalo necesario para observarlos, que es lo que ha hecho Mr. Gay-Lussac de un modo muy sencillo. Los orificios *o o* por donde entran los tubos en el vaso estan cerrados con tapones de corcho, en cuyo centro hay un agujero en que entra rozando el tubo correspondiente. ¿Se quiere observar el estado del gas G G? Se hace salir el tubo T G hasta que el estremo M de la columna de mercurio venga á presentarse en el orificio *o*, y se observa á qué division del tubo corresponde, conociéndose por consiguiente el volúmen del gas en este instante. ¿Se quiere observar el termómetro? Se le hace salir hasta que el estremo *t* de la columna de mercurio se presente en el orificio *o'*, y la division del termómetro á que corresponde indica la temperatura que tiene en aquel instante la capa horizontal líquida en que está colocado el gas.

Se puede conocer, pues, á cada momento, y del modo mas exacto la temperatura de este gas. Asi que poniendo al principio el agua del vaso á o, y elevando sucesivamente su temperatura hasta la ebullicion, ó recíprocamente, se podrá comparar muy bien la marcha del gas con la del termómetro; es decir, se conocerá á cada instante el volúmen aparente del mercurio y el volúmen aparente del gas. Restando de estos resultados, los efectos producidos por la dilatacion del vidrio de que estan hechos los tubos, se tendrán los volúmenes absolutos; y en fin, si la presion atmosférica ha variado en el tiempo que se ha hecho la esperiencia, que es lo mas frecuente, se corregirá el efecto de estas variaciones, segun la ley de Mariotte. De este modo se conocerán exactamente los volúmenes que ocupa una misma masa de gas á diversas temperaturas, suponiéndola espuesta siempre á una misma presion barométrica, por ejem-

plo á la de 0,86 metros. Hecho esto no habrá mas que comparar los volúmenes entre sí, para saber si la dilatacion es uniforme ó variable, porque si es uniforme, los aumentos sucesivos de volúmen serán proporcionales á los aumentos de temperatura; pero si la temperatura es creciente ó decreciente no se verificará esta proporcion. Haciendo las esperiencias de este modo y con todas las precauciones que hemos descrito, y repitiéndolas un gran número de veces, ya respecto al aire atmosférico, ya respecto á diferentes gases perfectamente secos, ha llegado Mr. Gay-Lussac á obtener los resultados siguientes.

Todos los gases permanentes espuestos á temperaturas iguales bajo la misma presion, se dilatan la misma cantidad exactamente. La estension de su dilatacion comun desde la temperatura del hielo al derretirse, hasta la de 100.° del termómetro centesimal, es igual á 0,375 de su volúmen primitivo á 0,° suponiéndose constante la presion. Entre estos dos límites, la dilatacion de los gases es exactamente proporcional á la dilatacion del mercurio; de donde resulta que por cada grado del termómetro centesimal, y bajo una misma presion, todos los gases se dilatán 0,00375 de su volúmen á la temperatura del hielo al derretirse.

Casi al mismo tiempo que Mr. Gay-Lussac, habia obtenido estos resultados, Mr. Dalton, hábil físico de Manchester; y últimamente han sido confirmados por nuevas esperiencias que han hecho MM. Dulong y Petit, con un aparato semejante al de Mr. Gay-Lussac. Mas habiendo hecho uso estos físicos de un baño de aceite fijo en lugar de agua, han podido estender mas la comparacion de las dilataciones, y han hallado que pasando de 100° el mercurio se dilata con mas rapidez que los gases, y tanto mas, cuanto mas se acerca el término de su ebullicion, resultado que le es comun con todos los demas líquidos, como veremos mas adelante. Igualmente han reconocido que el vidrio, el cobre, la platina y el hierro

siguen en estas temperaturas elevadas una marcha de dilatacion creciente, con respecto á los gases, y aun relativamente al mercurio, porque la dilatacion del vidrio crece en una proporcion tal, que disimula en parte la aceleracion del mercurio, y produce asi una dilatacion aparente mas inmediata á la uniformidad que la verdadera.

Mr. Gay-Lussac se ha asegurado igualmente de que las sustancias aeriformes producidas por la evaporacion de los líquidos, se dilatan absolutamente como los gases, mientras no vuelven al estado de liquidez. Para convencerse de esto, ha quitado las sales secantes del recipiente T T; ha introducido en el tubo TG gases sin preparar, y por consiguiente cargados de la humedad que pudiera haberse separado de ellos por medio de las sales. Asi, el espacio *G G* se ha llenado de una mezcla de gas y de vapores acuosos, y esta mezcla elevada sucesivamente á diferentes temperaturas, se ha dilatado absolutamente como hubiera hecho un volúmen igual de gas seco. Mas seria inútil buscar la misma ley, bajando la temperatura mas que el grado á que se hallaba al introducir el gas; porque mas adelante veremos por esperiencia, que un volúmen de gas á una temperatura dada, no puede contener sino cierta cantidad de agua reducida á vapor; de donde se sigue, que estando saturado de vapóres á cierto grado del termómetro, bajando este, ha de liquidarse una parte del vapor. Esta porcion que se liquida ocupa un volúmen mucho menor, y por consiguiente disminuirá el volúmen absoluto del gas, alterará su fuerza elástica, y por efectó de esta doble causa, hará variar las leyes de su dilatacion aparente.

Mr. Gay-Lussac ha examinado igualmente la dilatacion del vapor del éter, y ha hallado que es la misma que la de los gases, lo cual conduce á creer que este resultado es general respecto á todos los vapores, mientras permanecen en este estado.

Por medio de los resultados que acabamos de es-

poner, se pueden resolver exactamente todas las cuestiones físicas que se propongan sobre los volúmenes de una misma masa de gases puesta sucesivamente á diferentes presiones, y á diferentes temperaturas.

Supongamos, por ejemplo, que á la temperatura del hielo al derretirse, y bajo la presion de 0,76 metros, el volúmen de esta masa sea exactamente de un litro. Se pregunta ¿cuál será á la temperatura de 10.°, permaneciendo la misma presion? Para saberlo no hay mas que aumentarla 10 veces 0,00375 que representa la dilatacion correspondiente á un grado, es decir, 0,0975 litros, y asi el volúmen dilatado será á la nueva temperatura de 1,0375 litros.

Si queremos ahora hacer variar tambien la presion, y que sea por ejemplo de 0,38 metros en lugar de 0,76, será preciso, siguiendo la ley de Mariotte, dividir el volúmen 1,0375 por la nueva presion á que se le quiere poner, y multiplicarle por la misma presion 0,76 que se suponia sufrir al principio; puesto que á igual temperatura los volúmenes de una masa de gas son recíprocamente proporcionales á las presiones que sufren. La operacion, pues, es la misma que si se multiplica el volúmen por la relacion $\frac{0,76}{0,38}$ que es igual á 2, y el volúmen buscado será 2,0750 litros.

Recíprocamente si fuese dado este volúmen 2,0750 bajo la presion 0,38 y la temperatura 10.°, tratándose de saber el volúmen que ocuparia á 0.° bajo la presion de 0,76, la operacion seria precisamente inversa de la anterior. Le multiplicariamos por $\frac{0,38}{0,76}$, lo cual nos daria 1,0375 litros que tendria á la nueva presion 0,76; y dividiéndole en seguida por 1,0375, espresion de un volúmen dilatado de 0 á 10.°, se tendria por cociente 1 litro, que espresaria su volúmen primitivo á 0.° bajo la presion 0,76 metros. Este mismo método de reduccion se aplicaria á cualquiera otro ejemplo; y se usa á cada instante para referir las esperiencias á circunstancias comparables.

CAPITULO XI.

De la dilatacion de los líquidos por el calor.

Al estudiar las dilataciones de los gases y de los cuerpos sólidos, tanto entre sí, como con las del mercurio, desde el término del hielo al derretirse, hasta el del agua hirviendo, hemos visto que todas estas dilataciones seguian una marcha uniforme, es decir, que los volúmenes de estos diversos cuerpos, medidos á diferentes grados del termómetro comprendidos en este intervalo, eran siempre proporcionales entre sí. Esta uniformidad no se verifica en la dilatacion de los líquidos, sobre todo cuando se acercan al punto de su ebullicion ó de su congelacion; y la analogía hace creer que semejantes desigualdades se manifestarian en la dilatacion de los cuerpos sólidos si se calentasen hasta la fusion, y en la de los gases si se los pudiera enfriar hasta que se liquidasen. Estas curiosas propiedades que parecen depender de la constitucion misma de los cuerpos, y de la disposicion de las partículas que los componen, merecen ser estudiadas con el mayor cuidado.

Respecto á los líquidos, se puede conseguir de diferentes modos. El mas sencillo es el mismo que hemos empleado para los gases. Se toma un tubo de vidrio exactamente calibrado, y terminado por una bola cuya capacidad sea muy grande relativamente al tubo. Se mide esta capacidad, llenándolos de mercurio, como hemos esplicado en el capítulo anterior, y se divide el tubo en partes iguales; en fin, se llena la bola y una parte del tubo con el líquido que se quiere examinar; se le hace hervir para privarle del aire, y cuando se ha dilatado hasta llenar el tubo, se suelda este á la lámpara; en fin, se hace un verdadero termómetro. En seguida se coloca este aparato en un baño líquido que se eleva sucesivamente á diversas temperaturas, tomando todas las

precauciones que hemos esplicado para los gases. Observando las divisiones del tubo á que llega la columna, se conoce exactamente el volúmen que ocupa, y se puede medir su dilatacion. Una vez conocida, se vuelve á empezar, ó se continúa la esperiencia por un tiempo doble ó triple, y comparando entre sí los diversos valores de la dilatacion, se sabe si su marcha, comparada con la del mercurio, es uniforme ó variable.

Deluc ha construido un gran número de termómetros, con los cuales ha hecho esperiencias muy exactas sobre las dilataciones de los líquidos, cuya tabla puede verse en el tratado general. En ellas empleaba siempre líquidos privados de aire, preparacion que le ofrecia un medio de que sufriesen sin hervir temperaturas muy superiores á la de su ebullicion el aire libre. Asi sucede, por ejemplo, que el alcool rectificado que hierve al aire libre á una temperatura de 81.° centesimales, ó 65.° de Reaumur, privado de aire y encerrado en el vacío, sostiene sin hervir la temperatura de 100.°, y continúa calentándose y dilatándose por el calor. La causa de este fenómeno la conoceremos al establecer la teoría de la formacion de los vapores en el vacío y en los gases.

Tambien se puede determinar la dilatacion de los líquidos, pesando en ellos un mismo cuerpo metálico, cuya dilatacion se conoce poniendo el líquido á diferentes temperaturas. Este es el método que se ha empleado para la determinacion del gramo, como veremos mas adelante.

El agua es el líquido cuyas dilataciones se han estudiado mas; y aplicándola sucesivamente los diferentes métodos que acabamos de esplicar, se obtiene igualmente este resultado, que el agua al enfriarse no se contrae de una manera constante. Su contraccion disminuye á cada grado, cuando la temperatura baja hácia el 4.° grado del termómetro centesimal. Si la temperatura baja aun de este límite, el

volúmen del agua permanece algun tiempo constante, despues de lo cual se dilata en lugar de contraerse. Hay, pues, un punto en el que es menor el volúmen del agua que en cualquiera otra temperatura; entonces su *densidad* es la mayor posible, y en este caso es cuando tiene mayor masa en el mismo volúmen. Todas las esperiencias hechas sobre la determinacion de este maximum, hacen creer que se halla entre 3,° 43, y 4,° 44. El aumento de volúmen del agua en este término, llega hasta mas abajo de 0.°; pues segun una observacion de Mr. Blagden, el agua si se la conserva tranquila y resguardada del contacto del aire, puede enfriarse muy considerablemente bajo 0.° sin tomar el estado sólido; pero se hiela luego que se la agita, ó se introduce en ella un pedacito de hielo. Este fenómeno parece que proviene de que las moléculas del agua enfriadas con lentitud se vuelven gradualmente unas hácia otras, tomando las posiciones en que es mas enérgica su atraccion mútua, y por consiguiente la mas favorable al estado de solidez. Cuando se sumerge en ella un cristal de hielo, las moléculas que le componen no hacen mas, por decirlo asi, que llamar á esta misma posicion á las moléculas líquidas. La agitacion produce el mismo efecto cuando conduce á circunstancias análogas un número suficiente de partículas líquidas. Segun este modo de ver, la espansion que entonces esperimenta el sistema será un fenómeno secundario, dependiente de la constitucion individual de las partículas.

Los sabios franceses han adoptado el punto del maximum de condensacion del agua, para establecer la unidad de peso, en el sistema de medidas decimales; esta unidad de peso que se llama *gramo*, es igual al peso de un centímetro cúbico de agua destilada, á la temperatura del maximum de condensacion.

De aqui se sigue, que conociendo el número de centímetros cúbicos que contiene el volúmen de un

vaso, se sabe el número de gramos que contendria á la temperatura del maximum de condensacion, ó recíprocamente, si se determina por medio de la balanza el peso del agua que el vaso contiene á esta temperatura, se conocerá su volúmen contando por cada *gramo* un centímetro cúbico. No es tampoco necesario pesar el agua á la temperatura del maximum de condensacion, pues se puede referir á él por medio del cálculo, conforme á las leyes de la dilatacion de este líquido, que he espuesto en el tratado general.

Al estudiar las dilataciones de los otros líquidos cerca de los puntos de su congelacion y de su ebullicion, se descubren en ellos singularidades análogas á lo que acabamos de ver en el agua. Hay sustancias que se dilatan al helarse como el agua; tales son el hierro fundido, el bismuto, el antimonio, y el azufre. Otras por el contrario se contraen súbitamente al helarse, y el mercurio está en este caso, siendo su contraccion muy considerable, cuando se hiela, que es hácia los 39.° bajo o. Estos fenómenos pueden darnos algunas indicaciones sobre la colocacion que toman las partículas de los cuerpos al pasar del estado líquido al sólido, ó al aeriforme, y por lo mismo sobre las condiciones físicas que constituyen estos diferentes estados. Pero para poder entregarnos á estas consideraciones, es necesario reducir la espansion de los líquidos á leyes generales que podamos abrazar en el todo. Aqui me limitaré á decir, que la dilatacion absoluta del agua, determinada de este modo, desde o.° hasta 100.° es de 0,04660, es decir, unas 466 diez milésimas de su volúmen primitivo á o.° La del alcool bien rectificado entre los mismos límites, es de 0,12948, pero varía segun el grado de su rectificacion. En fin, la del mercurio es $\frac{100}{5412}$. segun MM. Lavoisier y Laplace.

El modo con que propagan el calor los cuerpos, segun son gaseosos, líquidos, ó sólidos, es tambien una consecuencia de su constitucion en estos tres es-

tados. Si el cuerpo es sólido, las partículas que primero se calientan, no pudiendo mudar de sitio comunican el esceso de su temperatura á las que las rodean, y solo de este modo, y de una en otra, se transmite este esceso á las partículas mas separadas. Esto se prueba poniendo el estremo de una barra metálica en un foco de calor constante, por ejemplo, plomo derretido, que se mantiene durante la esperiencia en el grado de fusion. Si se aplican á esta barra en varios puntos, termómetros cuyas bolas esten metidas dentro de la misma sustancia de la barra, y rodeadas de mercurio para hacer mas íntimo el contacto, se ven subir sucesivamente estos termómetros, y tanto mas pronto, cuanto mas próximos estan al estremo caliente de la barra. Por el contrario en los gases, cuyas partículas estan tan separadas unas de otras que es insensible su accion recíproca, las primeras que se calientan se dilatan de repente, y haciéndose asi mas ligeras que el resto del fluido en que nadan, se elevan por este esceso de ligereza. Una prueba sensible de este efecto se presenta en las habitaciones muy calientes, porque colocando termómetros á diferentes alturas, marcan temperaturas sucesivamente mayores, y alguna vez tan distintas, que en la parte inferior pueden vivir animales que moririan infaliblemente en la parte mas elevada de esta atmósfera. Tambien ofrecen un ejemplo de esto las habitaciones muy calientes en invierno; pues si se abre una puerta que comunique con el aire esterior, el aire frio que entra por la parte baja de esta abertura, y el caliente que sale por la parte alta, formando corrientes opuestas, cuya direccion se hace sensible, esponiendo á ellas la llama de una bugía. En fin, la corriente que se forma á lo largo de los tubos de las chimeneas, y en general de todas las superficies verticales que se calientan, es un efecto del mismo género, que algunas veces puede llegar hasta elevar los cuerpecillos ligeros que se pongan en su direccion.

Siendo las moléculas de los líquidos independientes entre sí, como las de los gases, se concibe que el calor debe producir en ellas movimientos del mismo género; pero tambien como estan mucho mas inmediatas unas á otras, una parte del calor podrá propagarse inmediatamente de molécula en molécula, como en los cuerpos sólidos; y aun si este efecto fuese mucho mas rápido que el otro, podria destruirle en parte ó en todo. Como no podemos conocer *à priori* cuál de estos dos casos se verifica, es necesario que la esperiencia lo decida. Esto prueba que en todos los líquidos conocidos hasta ahora, la propagacion del calor por comunicacion inmediata es estremamente débil y como insensible, comparada á la comunicacion por corrientes ascendientes.

Para aclarar este resultado es menester aislar estos dos modos de comunicacion; lo cual se consigue calentando una masa líquida por su parte superior ó enfriándola por la inferior. En el primer caso, haciéndose mas ligeras las partículas que se calientan, no pueden bajar; y en el segundo, siendo mas pesadas las partículas que se han enfriado, no pueden subir. A fin de conocer esto claramente, se toma un vaso de vidrio ó de otra materia que propague el calor lentamente, se sujeta un termómetro, de manera que su bola se halle en el fondo del vaso; y otro cuya bola corresponda á la parte superior; ó mejor aún, se agujerea el vaso de modo que puedan pasar los instrumentos, fig. 54. Se vierte entonces un líquido frio, por ejemplo, agua en la parte inferior del vaso, de modo que la bola del termómetro que se halla allí quede enteramente cubierta; despues, haciendo flotar sobre esta agua algunos cuerpos ligeros y de gran superficie, por ejemplo, una laminita de madera muy delgada, se vierte poco á poco sobre ella agua hirviendo, haciéndola bajar sin movimientos violentos por medio de un sifon: de este modo se tendrán dos capas fluidas sobrepuestas de temperaturas muy diferentes. Sin embargo, el

termómetro inferior no se calentará sensiblemente, á lo menos en los primeros instantes de la esperiencia. Del mismo modo, si se coloca en el fondo del vaso un pedazo de hielo, y se vierte agua sobre él, ni el hielo enfriará el agua, ni esta hará derretir al hielo sino muy lentamente. Variando las aplicaciones de este método, se producen una multitud de fenómenos curiosos, que confirman las leyes de la dilatacion de los líquidos, y que se han empleado particularmente para determinar el maximum de la densidad del agua.

CAPITULO XII.

De los vapores en general, de su formacion, y de su fuerza elástica en el vacío.

Hemos observado ya muchas veces que los líquidos calentados hasta el punto de la ebullicion en un vaso abierto y espuesto al aire libre, se convierten en vapores que se disipan en la atmósfera; hemos notado tambien que este fenómeno no se verifica solo á la temperatura de la ebullicion, puesto que se exhalan vapores acuosos de las paredes húmedas de un globo de vidrio, del que se estrae el aire; y hemos podido advertir que estos vapores tienen una fuerza elástica como los gases, pues hacen bajar el mercurio en el tubo barométrico adaptado á la máquina neumática. Pero no se forman solamente en el vacío estos vapores, sino á cualquiera temperatura. Tómese un globo de vidrio, y póngase en él una probeta AR, fig. 53, semejante á la de la bomba de condensar; despues, mojando las paredes interiores de este globo, estando en comunicacion con la atmósfera, ciérrese y obsérvese la presion interior que indica la probeta. Hecho esto, métase el globo en agua caliente á una temperatura conocida; el aire interior se dilatará y hará subir la probeta; mas la presion que ejerza será mayor de lo que debia ser, segun la

ley de dilatacion de los gases secos. Se forman, pues, en este caso vapores acuosos elásticos, que mezclándose con el aire aumentan su fuerza elástica.

Estos fenómenos se verifican tambien en todos los demas gases; por consiguiente es preciso estudiarlos con particularidad, para poder conocer con exactitud qué corresponde á la elasticidad de los gases, y qué á la elasticidad del vapor; y habiendo ya determinado completamente lo que pertenece á los gases secos, debemos ahora examinar por medio de la esperiencia las propiedades del vapor tomado aisladamente. Para esto nos bastará seguir paso á paso el escelente trabajo hecho sobre esta materia por Mr. Dalton en las memorias de Manchester del año 1805.

Este hábil físico empieza estudiando los efectos de los vapores en el vacío, y el método que emplea para ello es sumamente sencillo. Se toma un tubo de barómetro dividido en partes iguales, por ejemplo, en centímetros y milímetros; en seguida se pone en él mercurio acabado de hervir, de modo que le llene casi enteramente, y rellenándole con una capita de agua ó del líquido, cuyo vapor se quiere estudiar. Entonces, tapando este tubo con el dedo, se vuelve y se hace pasar el líquido muchas veces á lo largo del tubo; se le pone otra vez derecho, y se quita el dedo. Todo el líquido que no ha quedado adherido á las paredes del tubo sube hácia la abertura, llevando consigo algunas ampollitas de aire; se deja separar este aire, se acaba de llenar el tubo con mercurio, se tapa nuevamente con el dedo, y se le vuelve sumerjiéndole en un vaso lleno de mercurio, como si se quisiese hacer un barómetro ordinario. En realidad no es otra cosa que un barómetro, cuyas paredes interiores estan mojadas con el líquido de que se ha hecho uso; pero el mercurio baja mas en este de lo que bajaria en el mismo instante en un barómetro de mercurio hervido: porque los vapores que se exhalan de las paredes humedecidas del

tubo ejercen interiormente una fuerza elástica, que hace bajar la columna de mercurio. Para observar completamente estos efectos es preciso esperar algunos instantes, á fin de que la capa húmeda que moja las paredes del tubo tenga tiempo para desprenderse poco á poco, y venir á reunirse, á lo menos en parte, en la superficie del mercurio, donde forma una capa de uno ó dos milímetros de grueso. Entonces, comparando la columna de mercurio de este tubo con la que el peso de la atmósfera mantiene en el mismo instante en un barómetro privado de aire, el esceso de esta sobre aquella hace conocer la *fuerza elástica del vapor*, ó lo que se llama su tension. Por ejemplo, si la temperatura es de 18,°75, y el líquido empleado es agua bien pura, el mercurio estará en el barómetro donde obra el líquido unos 14 milímetros mas bajo que en el barómetro privado de aire. Si el líquido es eter será su tension mucho mas grande en iguales circunstancias.

Antes de pasar adelante vamos á examinar diferentes propiedades que distinguen esencialmente los vapores de los gases. La elasticidad de un gas, ó el resorte de su fuerza, aumenta si disminuye el espacio en que se halla encerrado; entonces el gas se comprime sobre sí mismo, resistiendo cada vez mas; y su fuerza elástica es recíprocamente proporcional al espacio que se le hace ocupar. Nada de esto sucede con los vapores, á lo menos cuando el espacio en que se hallan contiene toda la cantidad de vapor que naturalmente puede elevarse en él á la temperatura en que se obra. En este caso, sumerjiendo el tubo que los contiene en un vaso cilindrico, profundo y lleno de mercurio, fig. 56, á medida que se baja el tubo en el, se ve disminuir mas y mas el espacio CH ocupado por el vapor, sin notar ninguna variacion en la longitud AH de la columna interior. Luego, á medida que se estrecha el espacio en que existe el vapor, una parte de este pierde su elasticidad y vuelve al estado de líquido. Sumerjien-

do de este modo el tubo en el mercurio, se puede liquidar todo el vapor; lo cual se verifica cuando la porcion CA del tubo sobre el nivel del mercurio esterior iguala á la altura AH de la columna interior, mas el grueso que la capita líquida y el vapor líquido pueden ocupar.

Otra diferencia entre los vapores y los gases, que puede mirarse como una consecuencia de la anterior, es que si se aumenta en un espacio dado, la cantidad de materia gaseosa ó de materia susceptible de producír el gas, se aumenta al mismo tiempo la fuerza elástica que este ejerce; mas aumentando en un espacio dado la cantidad de líquido no evaporado, no se altera absolutamente la tension del vapor. Asi, esta será siempre la misma en el tubo barométrico de la esperiencia anterior, sea el que quiera el grueso de la capa líquida reunida sobre la columna de mercurio, siempre que se cuente en el cálculo con el peso de esta capita, que hace parte de la columna interior.

Es, pues, el carácter esencial de los vapores, que respecto á cada temperatura, no puede existir sino una causa limitada en un espacio dado: de suerte, que disminuyendo el espacio gradualmente, todo el esceso se reduce á líquido por la presion, sin aumentarse la fuerza elástica; mientras que los gases, resistiendo á la presion, pueden condensarse indefinidamente, sin que se reduzcan al estado de líquido con ninguna presion conocida. Esta es la razon porque se da á estos últimos muchas veces el nombre de *gases permanentes* para distinguirlos de los *vapores*.

El aumento de la fuerza elástica por el calor es tambien muy diferente en estas dos especies de fluidos aeriformes, á lo menos cuando se coloca en un espacio toda la cantidad de vapores que es capaz de contener. Las fuerzas elásticas de los gases secos á la temperatura del agua hirviendo y á la del hierro al derretirse son entre sí como 1,375 es á 1; y las

del vapor acuoso entre los mismos términos en un espacio bien saturado son entre sí como 150 á 1.

Despues de conocer las propiedades características de los vapores, el primer objeto de nuestras investigaciones debe ser medir sus fuerzas elásticas á diferentes temperaturas. El aparato que hemos empleado, siguiendo á Mr. Dalton, es muy á propósito para este objeto; no hay mas que rodear nuestro tubo con otro mas ancho, cerrado por su base con un largo tapon de corcho que atraviesa el tubo interior, fig. 57. Llenando el intervalo de los dos tubos de agua, puesta sucesivamente á diferentes temperaturas, se comunica esta misma temperatura al vapor; y para conocer exactamente su fuerza elástica se mide la altura de la columna de mercurio AH que se halla sostenida en el tubo sobre el nivel; y despues de haberla reducido á la temperatura esterior de la atmósfera, se resta de la que se observa en el mismo instante en un barómetro privado de aire. Solo sí, para que la esperiencia sea exacta es preciso medir la temperatura del agua que rodea al tubo con un termómetro cilíndrico que se estienda por toda su longitud, á fin de obtener la temperatura media de todas las capas.

Lo mas que puede hacerse bajar el mercurio en el tubo por el método que acabamos de describir es hasta el nivel esterior; pues si se le hiciese bajar aun mas no se podria observar el punto en que se detiene el vapor; por consiguiente la mayor fuerza elástica que se puede observar con este aparato es igual á la presion de la atmósfera. Para ir mas allá, Mr. Dalton se ha servido de un tubo encorvado en forma de sifon, fig. 58. Le llenaba en parte de mercurio con las precauciones que hemos dicho al principio, y en seguida hacia pasar al brazo mas corto el líquido que queria evaporar. La longitud de este brazo era tal, que el espacio ocupado en él por el vapor fuese muy poco considerable á la temperatura ordinaria de la atmósfera. Enderezando el apa-

rato veía si se verificaba la evaporacion, y señalaba sobre el brazo largo la altura del mercurio en el pequeño, lo cual fijaba la diferencia de nivel. Entonces, para elevar la temperatura del líquido, Mr. Dalton empleaba dos cubiertas de metal cilíndricas y concéntricas, fig. 59, cuyo interior se ajustaba con tapones al rededor del brazo del tubo que contenia el líquido. En seguida ponia entre ambas cubiertas agua á una temperatura conocida y tan elevada como queria; la fuerza elástica del vapor aumentada por el calor hacia bajar el mercurio en el brazo corto y subir en el mas largo: midiendo esta elevacion, duplicándola, y añadiendo la diferencia de nivel primitiva, tenia la altura total de la columna de mercurio en el brazo mayor sobre el nivel del mismo líquido en el mas pequeño; nivel que las cubiertas metálicas impedian ver. Añadiendo, pues, esta altura á la que la presion atmosférica sostenia en el mismo instante en un barómetro privado de aire, la suma espresaba la presion total que el vapor sostenia á esta temperatura, y por consiguiente era la medida de su fuerza elástica.

Mr. Dalton ha empleado al mismo tiempo que los métodos anteriores otro para conocer ó mas bien comprobar la tension del cuerpo acuoso entre las temperaturas de 0 y 100.° Para ello emplea este sencillo principio; cuando un líquido hierve bajo cierta presion de la atmósfera, su fuerza elástica es igual á la presion que esta atmósfera ejerce sobre su superficie. Ahora bien, para esponer un líquido á diferentes presiones atmosféricas menores que la ordinaria, no hay mas que ponerle bajo el recipiente de la máquina neumática, por cuyo medio se rarifica el aire lentamente y por grados. El barómetro adaptado á la máquina se eleva durante esta operacion y su altura, menos la que se observa en el mismo instante en el barómetro esterior da la medida de la presion ejercida por el aire contenido en el recipiente. Si el agua que se coloca en él se ha calentado á un gra-

do tal que empieza á hervir bajo esta presion, su fuerza elástica será igual á la del aire encerrado, y por consiguiente se podrá espresar por la longitud de la columna de mercurio que este aire sostiene. Asi, todo se reduce á poner de antemano un termómetro en esta agua para conocer su temperatura en el momento que empieza á hervir. Este segundo método, empleado por Mr. Dalton, le ha dado resultados que estan en perfecta armonía con las observaciones hechas en tubos vacíos de aire.

Mas adelante veremos que mezclándose el vapor con el aire en un espacio cerrado añade su fuerza elastica á la que el aire tenia por sí mismo. Segun este principio se podria creer que en la esperiencia anterior la fuerza elástica del agua que entra en ebullicion deberia unirse á la del aire contenido en el recipiente, y por lo mismo doblarla; lo cual es enteramente contrario á la esperiencia, pues la probeta no indica diferencia alguna cuando se verifica la ebullicion. Pero es preciso observar que solo la masa de agua líquida posee esta temperatura elevada que la hace hervir; el aire encerrado en el recipiente se halla á una temperatura muy distinta, y la conserva por el contacto con las paredes del mismo recipiente y del platillo de cristal de la máquina que se hallan á igual temperatura que él. Sabemos que permaneciendo la misma la temperatura de este espacio, no puede contener sino cierta cantidad determinada de vapor; y esta cantidad se forma luego que el vaso que contiene el líquido se coloca bajo el recipiente. Asi, cuando el agua llega á hervir, los vapores que se exhalan de ella con mas rapidez que antes no hacen mas que compensar los que se condensan al mismo tiempo sobre las paredes del recipiente y en el aire mismo, y por tanto no resulta el menor aumento en la fuerza elástica comun de la mezcla de aire y vapor, como en efecto prueba la observacion. Conoceremos exactamente la verdad de estas observaciones cuando hayamos exa-

minado los fenómenos que resultan de la mezcla de los vapores y de los gases; aquí solo nos limitaremos á indicarlas.

Mr. Dalton, por medio de los diversos métodos que acabamos de esponer, ha medido la fuerza elástica del vapor acuoso á diferentes temperaturas comprendidas entre 0 y 100.° del termómetro centesimal; y añadiendo aun algo á sus resultados, he deducido la tabla siguiente, que espresa la fuerza elástica del vapor en milímetros desde 20.° bajo 0 hasta 130.° sobre él. Por medio de esta tabla se puede comprobar fácilmente la regla que hemos enunciado en el capítulo 6.°

grados.	tension.	grados.	tension.	grados.	tension.	grados.	tension.
—20	1,333	18	15,353	56	119,39	94	611,18
—19	1,429	19	16,288	57	125,31	95	634,27
—18	1,531	20	17,314	58	131,50	96	658,05
—17	1,638	21	18,317	59	137,94	97	682,59
—16	1.755	22	19,417	60	144,66	98	707,63
—15	1,879	23	20,577	61	151,70	99	733,46
—14	2,011	24	21.805	62	158,96	100	760,00
—13	2,152	25	23,090	63	166,56	101	787,27
—12	2,302	26	24,452	64	174,47	102	815,26
—11	2,461	27	25,881	65	182,71	103	843,98
—10	2,631	28	27,390	66	191,27	104	873,44
— 9	2,812	29	29,045	67	200,18	105	903,64
— 8	3,005	30	30,643	68	209,44	106	934.81
— 7	3,210	31	32,410	69	219,06	107	966,31
— 6	3,428	32	34,261	70	229,07	108	994,79
— 5	3,660	33	36,188	71	239,45	109	1032,04
— 4	3,907	34	38,254	72	250,23	110	1066,06
— 3	4,170	35	40,404	73	261,43	111	1100,87
— 2	4,448	36	42,743	74	273,03	112	1136,43
— 1	4,745	37	45,038	75	285,07	113	1172,78
0	5,059	38	47,579	76	297,57	114	1209,90
1	5.393	39	50,147	77	310,49	115	1247,81
2	5,748	40	52,998	78	323,89	116	1286,51
3	6,123	41	55,772	79	337,76	117	1325,98
4	6,523	42	58.792	80	352,08	118	1366,22
5	6,947	43	61,958	81	367,00	119	1407,24
6	7,396	44	65,627	82	382,38	120	1448,83
7	7,871	45	68,751	83	398,28	121	1491,58
8	8.375	46	72,393	84	414,73	122	1534.89
9	8,909	47	76,205	85	431,71	123	1578,96
10	9,475	48	80,195	86	449,26	124	1623,67
11	10,074	49	84,370	87	467,38	125	1669,31
12	10,707	50	88,742	88	486,09	126	1715,58
13	11,378	51	93,301	89	505,38	127	1762,56
14	12,087	52	98,075	90	525,28	128	1810,25
15	12.837	53	103,06	91	545,80	129	1858,63
16	13,630	54	108,27	92	566,95	130	1907,67
17	14,468	55	113,71	93	588,74		

Conocida de este modo la fuerza elástica del vapor del agua en todas las temperaturas en que se puede observar, Mr. Dalton ha tratado de determinar igualmente la de los vapores de los otros líquidos; y haciendo esperiencias con el eter sulfúrico, el alcool, el amoniaco líquido, una disolucion de muriate de cal, el ácido sulfúrico y el mercurio, ha descubierto esta ley general, que la variacion de la fuerza elástica del vapor, respecto á un mismo nú-

mero n de grados del termómetro, es exactamente la misma en todos los líquidos, partiendo de la temperatura en que son iguales dichas fuerzas. Asi, suponiendo, por ejemplo, dos líquidos, eter y agua, sometidos á la misma presion de 0,26 metros, se halla por esperiencia que el agua hierve á 100.° del termómetro, y el eter á 39.° Por consiguiente á estas temperaturas son iguales entre sí las fuerzas elásticas de ambos vapores, pues sostienen igualmente una presion de 0,76 metros. Ahora bien, si se disminuye 10 grados cada temperatura, quedando el agua á 90 y la del eter á 29.°, se halla que sus fuerzas elásticas son tambien iguales, y han disminuido una y otra 0,23472 metros, es decir, que solo sostienen 0,52528 de presion, como indica la tabla respecto al vapor del agua, 10.° bajo el de su ebullicion.

Otro ejemplo. El eter de que hacia uso Mr. Dalton hervia á 38,°888 bajo una presion barométrica, igual á 0,75565. Mojó con este eter un tubo barométrico lleno de mercurio, tomando todas las precauciones que hemos dicho antes. Habiéndole vuelto en seguida, é introducido en la cubeta, se elevó una capita de eter en pocos minutos sobre la columna de mercurio, y la altura de esta se hizo al fin estacionaria á 0,4318 metros. La temperatura del aire de la pieza en que hacia la esperiencia era 16,°666, y el barómetro en el mismo instante marcaba 0,75565. Se tenia, pues, respecto á este eter:

	Temperatura.	Fuerza elástica.
1.ª esperiencia.	38°,888	0,m 76555
2.ª esperiencia.	16, 666	0,m 75565 — 0,m 4318 = 0, 32385
difer.ª de temperaturas. .	22, 222	

Para comparar estos resultados con los que da el vapor acuoso es preciso buscar desde luego la temperatura á que este sostiene la presion 0,75565; y segun nuestra tabla, esto se verifica á 99,°836. Asi, pues, la fuerza elástica del vapor á esta temperatu-

ra es igual á la del eter en la primera esperiencia. La segunda está hecha á una temperatura 22,°222 mas baja; bajemos, pues, otro tanto la temperatura 99,°836, y tendremos 77,°614. Si la ley es cierta, la fuerza elástica del vapor del agua á esta temperatura debe ser igual á la del eter en el segundo caso; y en efecto, segun nuestra tabla, aquella es de 0.31871 metros exactamente, en lugar de 0.32385 metros que da la observacion del eter. El error es de 0,00514 metros.

Mr. Dalton esperimentó esta misma ley respecto de otras temperaturas; ya bajo el punto de ebullicion, y ya sobre él; y la halló siempre exacta. Pero como la fuerza elástica del eter se hace muy considerable á temperaturas elevadas, porque es fuerte por sí misma, aun en las bajas, se vió precisado á emplear un barómetro de sifon, fig. 59; lo cual le proporcionó tambien el poder comprobar la ley de las fuerzas elásticas del vapor acuoso á temperaturas mas elevadas que las que hubiera podido emplear por medio de la observacion directa. Por ejemplo, ensayando asi el vapor del eter á la temperatura de 63,°888, halló que sostenia una columna de mercurio igual á 0,889 metros ademas de la presion atmosférica, que entonces era 0,75565 metros, siendo por consecuencia la fuerza elástica del vapor á aquella temperatura 1644,65 milímetros. Para compararla con la del vapor acuoso es necesario partir de la temperatura en que este último sostiene la presion de 0,75565 metros, que como acabamos de ver, es 99,°836. A esto debe añadirse el aumento de la temperatura que ha sufrido el eter desde el grado de su ebullicion, es decir: 63.°888 — 38.°888 ó 25°: lo cual da 124.°836: buscando, pues, en nuestra tabla la fuerza elástica del vapor del agua á esta temperatura, se halla que es de 1661,82 milímetros, en lugar de 1644.65 milímetros que da la observacion del eter. La diferencia es 17.17 milímetros; y parecerá bien pequeña con respecto á la grande incer-

sidad de la fuerza absoluta, si se atiende á los muchos motivos de error que llevan siempre consigo semejantes observaciones. Las esperiencias hechas por Mr. Dalton sobre el alcool, el amoniaco y el muriate de cal, confirmaron igualmente la ley anterior; y como el método es el mismo, es inútil entrar en ningun por menor acerca de ellas.

De aqui resulta que los líquidos que hierven á temperaturas muy elevadas deben dar vapores, cuya fuerza elástica es sumamente pequeña en las temperaturas ordinarias. Tomemos, por ejemplo, ácido sulfúrico, tal, que bajo una presion de 0.26 metros hierva á la temperatura de 300.° Si se eleva su temperatura á 200.°, es decir, 100.° mas abajo del término de su ebullicion, su vapor tendrá la misma tension que el del agua á 0, es decir, será de 5 milímetros. Pero si el ácido no se eleva mas que á la temperatura de 100.°, la tension de su vapor será la misma que la del del agua á 100.° bajo 0, es decir, será absolutamente inapreciable. Las mismas consideraciones se aplican á los vapores del mercurio, que no hierve sino á la temperatura de 349: y resulta que la tension de estos vapores á la temperatura ordinaria debe ser estremamente pequeña. No pueden, pues, producir en el vacío de los tubos barométricos ninguna elasticidad sensible, ni por consiguiente ninguna depresion que haya de tenerse en cuenta. Los cuerpos sólidos, que no se funden ni hierven sino á temperaturas escesivamente elevadas, no deben por la misma razon producir vapores sensibles en el vacío barométrico; y asi no ejercen en él ninguna depresion. Sin embargo, algunos de estos cuerpos, por ejemplo, el estaño, el plomo y el cobre, exhalan olores que se hacen sensibles á nuestros órganos; el alcanfor despide tambien un olor muy penetrante; y no obstante, no produce sino una tension insensible en el vacío á la temperatura ordinaria. Pero si se le calienta acercando al tubo un carbon encendido, ó rodeandole con una chapa de

hierro caliente, su evaporacion se hace sensible, y la columna de mercurio baja una cantidad notable: luego que se quita la causa que produce el calor se ve subir el mercurio en el tubo, y el vapor del alcanfor vuelve á tomar el estado sólido, depositándose sobre las paredes interiores del tubo en forma de un polvo blanco muy fino.

Las afinidades que los sólidos ejercen sobre ciertos líquidos se manifiestan en el vacío disminuyendo la tension de sus vapores. Por ejemplo, el agua en que se ha disuelto sosa ó potasa hierve á una temperatura mas elevada que el agua pura; y por consiguiente el vapor de esta disolucion en el vacío debe tener una tension menor que la del agua comun, como en efecto se verifica. Pero esta disminucion de tension se deja conocer aun sobre el vapor ya formado. Si despues de haber introducido agua pura bajo un tubo barométrico, y se ha observado exactamente su tension, se hace entrar un pedacito de sosa, que por su misma ligereza se eleva por el mercurio, y va á reunirse á la capita líquida en que queda enteramente sumerjido, se ve casi en el momento disminuir la tension del vapor; y al cabo de pocos instantes se halla reducida al grado que conviene á una agua saturada de sosa. Sin embargo, ni un átomo de esta sosa ha entrado en el vapor; y las moléculas de vapor elevadas á lo mas alto del tubo ni aun estan en contacto con ella inmediatamente. ¿Cuál es, pues, la especie de modificacion que sufren, y que puede disminuir asi su fuerza elástica?

La misma reflexion puede hacerse sobre todas las disoluciones salinas. Casi todas ellas hierven á temperaturas mas elevadas que el agua; y por consiguiente á temperatura igual la fuerza elastica de sus vapores es menor que la del vapor del agua. Sin embargo, tanto en un caso como en otro, el vapor que se eleva es en realidad un simple vapor acuoso sin ningun átomo de sal; pues si se continúa

la evaporacion de estas disoluciones hasta convertir en vapor todo el líquido, los vapores se condensarán formando agua destilada, y todo el peso de la sal se hallará en el resíduo sólido. ¿Cómo, pues, este vapor acuoso, que es siempre el mismo, puede tener á la misma temperatura diferentes fuerzas elásticas?

Es preciso que esta desigualdad provenga de la diferencia de los líquidos sobre que reposa el vapor, y de la desigual afinidad que ejerce sobre ellos; pues estas circunstancias son las únicas que varían en los diferentes casos que examinamos. Esto nos conduce á considerar las diversas capas horizontales que componen el vapor, como apoyándose mútuamente unas sobre otras en virtud de su elasticidad, hasta la última que descansa inmediatamente sobre el líquido. La fuerza elástica de esta es necesariamente la misma que aquella con que el líquido arroja los vapores, sea la que quiera la causa que le da esta tendencia y esta facultad. Si el líquido es al principio agua pura, y muda en seguida de constitucion, de modo que su tension se debilite, entonces las capas de vapor que reposan inmediatamente sobre su superficie estarán mas comprimidas por la elasticidad de las capas superiores que sostenidas por la tension del líquido. Deberán, pues, precipitarse en él, y reducirse al estado líquido por razon de la afinidad. Lo mismo sucederá con las capas que esten inmediatamente sobre las primeras, cuando lleguen á estár en contacto con el líquido, hasta que al fin la elasticidad del vapor enrarecido llegue á ser exactamente igual á la tension del líquido, es decir, á la fuerza que este emplea en la formacion de vapores.

Estas consideraciones esplican el efecto de un aparato muy ingenioso, inventado por Mr. Gay-Lussac para medir la tension del vapor acuoso á temperaturas muy bajas, y aun sumamente inferiores al grado de la congelacion. Se compone de un tubo barométrico, cuyo estremo superior está en-

corvado hasta un poco mas abajo de la horizontal, como se ve en la fig. 60. Una pequeña cantidad de agua, introducida antes de volver el tubo, se evapora luego que este se pone vertical, y hace bajar el mercurio una cantidad determinada por su tension á la temperatura esterior; ahora se trata de poner este vapor en la temperatura dada. Para esto, Mr. Gay-Lussac introduce el estremo superior C del tubo en un vaso lleno de una mezcla refrigerante, y en cuyo centro hay un termómetro; y asi hace bajar la temperatura de esta parte. El vapor que se halla en ella pierde parte de su fuerza elástica, se precipita, y es reemplazado por otra cantidad de vapor, que se precipita igualmente, continuando asi hasta que toda el agua que habia quedado líquida en H, se haya evaporado completamente y se haya precipitado en C. Entonces la parte que queda en estado de vapor no tiene mas que el grado de tension que conviene á la temperatura C; y aplicando aqui el mismo razonamiento que antes, se ve que en general, en un tubo calentado desigualmente, el grado de tension del vapor está determinado por la temperatura mas baja. No resta, pues, mas que observar esta tension, comparando la altura del mercurio en el tubo que tiene el vapor con su altura en el mismo instante en un barómetro perfectamente privado de aire. Para que estas medidas sean mas exactas, Mr. Gay-Lussac emplea un anteojito horizontal, que puede moverse verticalmente como una corredera sobre una escala graduada, y que contiene en su parte interior un micrómetro, cuyos hilos pone tangentes á la superficie del mercurio en ambos tubos, fig. 61. De este modo ha hallado que á —19,°59 del termómetro centesimal, la tension del vapor acuoso es de 1,353 milímetros, y calculándole por nuestra tabla se halla igual á 1,3723. Esto hace ver que la ley deducida de las esperiencias de Mr. Dalton sobre el agua en el estado líquido se aplica tambien á temperaturas mucho mas bajas que la de

la congelacion; y asi la solidificacion del agua no tiene ninguna influencia sobre la tension de su vapor; fenómeno digno de notarse, y que no es de los menores descubrimientos del ingenioso físico que acabamos de citar.

Indicaremos tambien la disposicion de otro aparato muy elegante y muy cómodo, inventado tambien para observar comparativamente las tensiones de diversos líquidos á temperaturas perfectamente iguales. Este aparato está representado en la fig. 62, y se compone de cierto número de tubos barométricos, elevados sobre una misma cubeta, y colocados circularmente al rededor de un mismo eje vertical. Paralelamente á su direccion está colocada una columna dividida en milímetros, y armada de una corredera C. Uno de los tubos es un barómetro privado de aire. En cada uno de los otros se introduce una pequeña cantidad de líquidos de diferente naturaleza, cuyas diversas tensiones hacen bajar mas ó menos las columnas de mercurio. Haciendo girar estos tubos al rededor de la columna vertical se les pone sucesivamente delante de la division; y por medio de la corredera se fija la altura de la columna de mercurio que se halla encerrada en el que se mira: repitiendo la misma operacion con el tubo privado de aire, se conoce la presion de la atmósfera en el mismo instante; y el esceso de la segunda medida sobre la primera espresa la fuerza elástica del líquido.

La tension de los vapores puede observarse tambien cómodamente á todas las temperaturas por medio del aparato representado en la fig. 63. Es un globo de vidrio, cuyo cuello está cerrado por una lámina armada de una ó muchas llaves, y atravesada por el tubo de un barómetro de sifon, cuyo brazo abierto se halla espuesto á la tension del aire ó gas interior. Se empieza formando el vacío lo mejor que sea posible en este globo; y se anota la pequeña tension de uno ó dos milímetros que ejerce sobre el

barómetro el aire que no se ha podido estraer; despues se cierra la comunicacion con la máquina, volviendo la llave T, y se introduce el líquido. Para esto se hace uso de una llave doble R R′; se abre primeramente R′ estando cerrada R, y se vierte el líquido en el espacio RR′; despues se cierra R′ y se abre R. Entonces el líquido se precipita en el vacío; y produce en él *instantáneamente* la cantidad de vapor que corresponde á la temperatura actual. La fuerza elástica de este vapor se mide por la elevacion que produce en el barómetro interior, y puede variarse segun se quiere, metiendo el globo en un baño líquido mas ó menos caliente.

Este aparato se llama *manómetro.* Algunas veces se emplean esferas de un volúmen bastante considerable para poder introducir en ellas animales, plantas, y en general todas las sustancias, cuyas modificaciones quieren observarse, ó recojer sus productos. La elevacion ó depresion del barómetro interior indica si los gases contenidos en el aparato han aumentado ó disminuido de elasticidad. Si ademas de esto se quiere conocer su naturaleza, no hay mas que reemplazar la llave R′ por otra semejante R″, sobre la cual hay un tubo T, que se llena enteramente de mercurio. Se atornilla este tubo sobre la llave R, despues de llenar de mercurio el intervalo que separa ambas llaves; hecho esto, se abre R″, y el mercurio cae por su propio peso en el manómetro, siendo reemplazado por un volúmen igual de la mezcla gaseosa que hay en lo interior; se cierra R″, y se quita el tubo T para poder hacer con esta mezcla todas las esperiencias químicas y físicas que se deseen.

La teoría de la formacion y del resorte de los vapores es de una aplicacion muy frecuente en las artes, y pueden verse varios ejemplos en el tratado general. Respecto á las investigaciones físicas es de un uso continuo.

CAPITULO XIII.

Medida del peso de los vapores bajo un volúmen dado á una presion y temperatura determinadas.

En las esperiencias que hemos esplicado en el capítulo anterior se puede notar fácilmente una pequeña cantidad de líquido basta para dar un volúmen considerable de vapor. Una multitud de investigaciones físicas y químicas exijian que se conociese la medida de esta espansion, es decir, por ejemplo, qué se supiese determinar el volúmen del líquido que ha producido un peso ó un volúmen dado de vapor. Esta determinacion parecia bastante difícil; porque siendo muy considerable la espansion del vapor, es casi imposible reunir en una sola masa el líquido de que se ha formado. Mr. Gay-Lussac ha eludido felizmente esta dificultad, invirtiéndola, es decir, determinando el volúmen de vapor que puede producir un volúmen dado de líquido.

Para conocer ante todo de un modo perfectamente seguro la cantidad de líquido empleada, que es lo que realmente constituye la dificultad del problema, Mr. Gay-Lussac forma á la lámpara ampollitas de vidrio, representadas por B B, fig. 63. Son casi esféricas, pero por un lado forman un pico muy frio. Se empieza pesando una de estas ampollitas llena de aire; se introduce en ella el líquido como en un tubo de termómetro, esto es, sumerjiéndola en el líquido, despues de haberla calentado para arrojar el aire; y cuando está llena se cierra el pico por medio de un soplete; operacion que no quita nada al vidrio de que está hecha la ampollita, sino solo le da otra forma. Se pesa de nuevo la ampollita llena, y rebajando de su peso el de la cubierta que se ha obtenido por la operacion anterior, se conoce el peso del líquido que contiene. Pronto co-

noceremos el modo de sacar de él su volúmen. Para reducir ahora á vapor toda esta cantidad de líquido, Mr. Gay-Lussac emplea un aparato análogo al que usa Mr. Dalton para observar la tension de los vapores en el vacío. Se vale de una campana de vidrio larga y estrecha V V, fig. 64, dividida en partes de igual capacidad, y cuyo volúmen total es poco mas ó menos de litro y medio; la llena de mercurio, y la vuelve sobre un baño del mismo metal, introduciendo en seguida en ella la ampollita de vidrio llena del líquido. Esta sube á la parte superior del tubo, llevando consigo todo el líquido que contiene, y solo resta evaporarle. Para conseguirlo rodea la campana de un manguito de vidrio M M mas largo que ella, y que está sumerjido en el mercurio por su parte inferior; llena de agua este cilindro, hasta que está cubierta enteramente la campana, y coloca todo el aparato sobre un horno F F, en que enciende fuego. El agua y el mercurio se calientan, y comunicando el calor al líquido contenido en la ampollita, este se dilata, rompe el vidrio que le contiene, se sube á lo alto de la campana, y allí se reduce á vapor, cuya temperatura crece hasta que el agua del cilindro entra en ebullicion; en cuyo caso se mide la columna de mercurio que queda sobre el nivel esterior. Mr. Gay-Lussac lo hace de este modo: los bordes del vaso de hierro v v, que sirve de cubeta estan bien desalabeados y colocados horizontalmente por medio de un nivel; sobre estos bordes coloca una regla de cobre C C, atravesada por una varilla vertical graduada T T, terminada en su parte inferior por una punta que hace bajar hasta que toca á la superficie del mercurio. Una corredera H, que sube y baja á lo largo de esta varilla, es conducida por un movimiento de rosca hasta la altura á que queda el mercurio dentro de la campana; y la distancia de esta corredera al estremo inferior de la varilla, medida por la division de esta misma, indica la altura de la columna de mercurio.

Restando esta altura de la que tiene en el mismo instante el mercurio en un barómetro privado de aire, despues de haber reducido ambas á una misma temperatura, el esceso de la segunda sobre la primera espresa exactamente la fuerza elástica del vapor contenido en la campana, es decir, la presion que sostiene. Por otra parte se conoce el volúmen de este vapor por el número de divisiones que ocupa en la campana; y con estos datos se puede calcular las relaciones de los volúmenes del líquido y del vapor á una temperatura, y bajo una presion determinadas.

Pero antes de entrar en este cálculo es, preciso prevenir una dificultad que podria ofrecerse; pues se podria preguntar si hay una completa seguridad de que se ha evaporado todo el líquido introducido bajo el mercurio. En efecto, si no lo estuviese se podrian cometer grandes errores, y podria suceder si se introdujese en las ampollitas de vidrio mas cantidad de líquido que la que conviene para que se evapore en la campana á la temperatura á que se le espone. Mas hay siempre un medio fácil y seguro para saber si se verifican estas circunstancias. En efecto, las tensiones de los líquidos que se examinan se conocen por las esperiencias del capítulo anterior; y se puede calcular con arreglo á la ley de Mr. Dalton cuál debe ser, respecto á cada uno de ellos la fuerza elástica total de su vapor á la temperatura de 100.º Si hay un resto de líquido bajo la campana, la presion ejercida interiormente por el vapor deberá ser igual á este límite; bastará, pues, medirla como hemos esplicado antes por la altura de la columna de mercurio de la campana. Si se halla que es igual á la fuerza elástica total que el líquido puede tener á la temperatura de 170.º se puede temer que no se haya evaporado todo el líquido introducido, y entonces será necesario emplear ampollitas que contengan menor volúmen. Pero en el momento en que á fuerza de disminuir este volúmen

se llegue á obtener una fuerza elástica menor que la total, se tendrá seguridad de que el líquido introducido se ha evaporado completamente, puesto que este líquido no ha bastado para desenvolver bajo la campana todo el vapor que convenia á esta temperatura; de suerte, que el que hay en la campana es un vapor dilatado al modo de los gases, y que hasta llegar al grado de su fuerza elástica total se condensaria como ellos sin liquidarse si se disminuyese el espacio que ocupa, metiendo mas la campana en el baño de mercurio en que está sumerjida. Esta última reflexion nos hace conocer que es necesario reducir todos los resultados á una misma presion para que sean comparables entre sí; y nos indica lo que debemos hacer para conseguirlo; pero en vez de efectuar esta correccion mecánicamente, y por esperiencia, es incomparablemente mas cómodo y mas sencillo hacerlo por el cálculo, segun las leyes que se conocen de la condensacion de las sustancias aeriformes bajo diferentes presiones. Esta operacion se halla esplicada largamente en el tratado general.

Mr. Gay-Lussac ha hallado de esta manera que un gramo de agua destilada líquida da un volúmen de vapor igual á 1,6964 litros, medido á la temperatura de 100.°, y bajo la presion de 0,76 metros. Ahora bien, un gramo de agua, tomado á la temperatura del maximum de condensacion, ocupa precisamente un centímetro cúbico, y el litro contiene mil. Asi el centímetro cúbico de agua á aquella temperatura llena reducido á vapor en las circunstancias precedentes un espacio igual á 1696.4 centímetros cúbicos. Resulta, pues, que 1000 centímetros cúbicos, ó un litro de este vapor, pesa $\frac{1}{1.693}$ gramos.

En uno de los capítulos siguientes veremos que un litro de aire atmosferico seco, tomado á la temperatura de 100.°, y bajo la presion 0,76 metros, pesa $\frac{1}{1.0577}$ gramos. Asi, en estas circunstancias semejantes, el peso del vapor acuoso es al del aire como 10577 es á 16964, es decir, con corta dife-

rencia como 10 es á 16. Y segun la igualdad de dilatacion de los vapores y de los gases, esta relacion de $\frac{10}{16}$ subsistirá siempre que el aire y el vapor acuoso se hallen sometidos á una misma temperatura y á una misma presion, cualquiera que sea.

Por medio de una esperiencia semejante, hecha con el eter sulfúrico, ha hallado Mr. Gay-Lussac que un gramo de este eter, reducido á vapor, ocupa 0,44313 litros, es decir, como una cuarta parte del espacio que ocupa un gramo de vapor acuoso; de donde se sigue, que á fuerza elástica y á temperatura igual, el vapor del eter sulfúrico es mucho mas pesado que el del agua. Segun este resultado se pudiera creer que los líquidos mas evaporables son los que dan vapores mas pesados; y el alcool favoreceria á esta congetura, pues siendo su grado de ebullicion mas elevado que el del eter, y mas bajo que el del agua, sus vapores son mas pesados que los acuosos, y mas ligeros que los del eter. Pero Mr. Gay-Lussac se ha convencido de que esta ley no es general; porque el carburo de azufre hierve á una temperatura mas alta que el eter, y sin embargo, sus vapores son mas pesados que los de aquel. Mr. Gay-Lussac ha examinado tambien el peso de los vapores formados por mezclas de agua y alcool en diferentes cantidades, y ha hallado que este peso á la temperatura de 100.° era exactamente el mismo que si hubiesen estado aislados los vapores de ambos líquidos; y en efecto, lo estan en estas esperiencias, pues Mr. Gay-Lussac se ha convencido de que la combinacion se destruye por la evaporacion. La misma ley se aplica á las combinaciones de alcool y eter, y probablemente á todas las combinaciones que son bastante débiles para poderse desunir á la temperatura de 100.° ¿Sucederá lo mismo en temperaturas mas bajas? Seria muy útil el saberlo, pues con esto se veria si la separacion de los líquidos en estas circunstancias proviene de la elevacion de temperatura, ó del acto mismo de la evaporacion.

Conociendo el volúmen que ocupa un peso dado de vapor á la temperatura de 100.° bajo la presion de 0.76 metros, se puede deducir el volúmen que esta misma masa ocupará bajo otra presion y á otra temperatura; no habrá mas que dilatar ó condensar por el cálculo el volúmen primitivo, con arreglo á las mismas leyes que los gases permanentes; pues hemos visto que los vapores, mientras permanecen en este estado, se dilatan y contraen como los gases. Pero para que el resultado abstracto obtenido por medio de esta reduccion pueda efectivamente realizarse, será necesario que el vapor á que se aplica pueda subsistir fisicamente en el estado aeriforme en las circunstancias á que se supone conducido por el cálculo.

CAPITULO XIV.

De la mezcla de los vapores con los gases.

Mr. Dalton va á servirnos tambien de guia en esta materia; mas antes de hacer conocer sus esperiencias, y las leyes á que conducen, es útil recordar lo que se verifica en la mezcla de los gases secos entre sí. Al examinar la ley de las condensaciones del aire y de los gases secos, bajo diferentes presiones, siendo igual la temperatura, hemos visto que la fuerza elástica de un gas cualquiera es inversa del volúmen que ocupa: de suerte que si dos decímetros cubicos de aire sostienen la presion de 0.76 metros, reducida esta masa á un decímetro cúbico, sostendrá una presion doble, es decir, de 1.52 metros. Pero en esta operacion no hemos hecho otra cosa que obligar a los dos gases á mezclarse en un espacio dado: y vemos que al unirse sus fuerzas elásticas se reunen, como sucederia si tomando separadamente cada volumen, pudiera estenderse libremente, en el espacio en que se le obliga á entrar. Esta regla es general en la mezcla de los gases se-

cos, pues no es mas que un resultado de la ley de Mariotte; pero se estiende igualmente á la mezcla de vapores, ya entre sí, ya con los gases secos, como veremos muy pronto por esperiencia; de donde resulta esta ley general respecto á la mezcla de fluidos elásticos, de cualquiera naturaleza que sean: dado un número cualquiera de fluidos elásticos que respectivamente sostengan las presiones $p\ p'\ p''$ &c., y que no puedan combinarse unos con otros á la temperatura á que se opera, si se toma un volúmen V de cada uno de estos fluidos, y se reducen todos estos volúmenes á uno solo igual á V, la fuerza elástica de la mezcla será igual á la suma de las fuerzas elásticas parciales, es decir, á $p + p' + p'' +$ &c. Esta ley está ya demostrada respecto á los gases secos: vamos á demostrarla respecto á su mezcla con los vapores.

Para hacerlo con exactitud á las temperaturas ordinarias, nada mas cómodo que el siguiente aparato, empleado por Mr. Gay-Lussac en sus esplicaciones de física. Se toma un tubo de vidrio cilíndrico A B, fig. 65, dividido en partes de igual capacidad, y que lleva en sus dos estremos dos llaves de hierro R R'. Un poco mas arriba de la llave inferior se adapta otro tubo encorvado T T' de menor diámetro que el cilindro A B, y que comunica con el interior de este en T. Se seca bien todo este aparato, calentándole, despues de lo cual se abre la llave R', y se llena el cilindro de mercurio bien hervido, de modo que se llene totalmente, con lo cual el mercurio sube en el tubo estrecho, poniéndose al mismo nivel. Hecho esto se atornilla en R', un globo lleno del gas que se quiere probar, y que suponemos que se halla perfectamente seco; y abriendo la llave *r* del globo, y la del cilindro R' se halla espedita la comunicacion entre el interior de uno y otro; pero si el gas contenido en el globo se ha introducido en él á la presion ordinaria de la atmósfera, como generalmente sucede, no hará bajar el mercurio en el cilindro A B, puesto que para esto

seria necesario que se elevase sobre su nivel en el tubo T T.′ Para esto sirve la llave inferior; se abre, y saliéndose el mercurio por su mismo peso hace lugar al gas que se estiende por el cilindro A B. Cuando se cree haber introducido mas cantidad suficiente, se cierra la llave R, con lo cual cesa la espansion del gas; se cierra igualmente R′, y el gas seco introducido en el cilindro A B no puede ya salir de él.

Es preciso tener presente que este gas se halla dilatado, y por consiguiente su fuerza elástica es menor que la presion atmosférica; y por lo mismo al salir el mercurio por la llave R, ha debido bajar menos el nivel interior, que supondremos en H, que el del tubo estrecho T T′. Supongamos que este ha bajado hasta *h*. En este caso, se pone mas mercurio en este tubo, hasta que se halle á igual altura en ambas partes, con lo cual se sabe ciertamente que el gas introducido en el cilindro, se halla exactamente con mas fuerza igual á la presion atmosférica, la cual se conoce observando la altura del mercurio en el barómetro, y se mide el volúmen del gas contando el número de divisiones que ocupa en el cilindro graduado.

Para introducir en este gas el líquido que se quiere reducir á vapor, se pone sobre la llave R′, otra llave R″ que tiene sobre sí un vasito metálico V, en que se coloca el líquido. La llave R″ no está atravesada en su centro por un canal cilíndrico, como las llaves ordinarias, sino tiene solamente sobre la superficie del cono interior una muesquita esférica O, que solo puede contener una gota de líquido. Cuando el cono R″ O está colocado de modo que esta muesquita coincide con el fondo del vaso V, se llena del líquido; y haciendo dar media vuelta al cono R″ O, conduce esta gota al interior del cilindro A B. De este modo se pueden introducir en el aparato las gotas que se quieran, y observar el efecto gradual de su evaporacion sobre el volúmen del gas; pero antes

de empezar á introducir el líquido, es preciso, despues de atornillar R″ sobre R′ abrir esta llave para dar comunicacion al espacio R″ R′ con el gas contenido en AB.

La primera gota de líquido introducida en el gas seco aumenta su fuerza elástica y hace subir el mercurio en el tubo lateral TT′ Este efecto es pronto, pero no instantáneo, como lo seria si el líquido se introdujese en el vacío, donde se ve que la presion del gas sobre el líquido, opone un obstáculo á la evaporacion. Si una gota del líquido no basta para formar la cantidad de vapores necesaria á este espacio á la temperatura á que se hace la esperiencia, se nota al momento, porque la introduccion de una segunda gota aumenta aun la fuerza elástica del gas; pero despues de haber introducido un cierto número de gotas, la adicion de una cantidad mayor no produce ya ningun efecto, y el esceso del líquido queda sobre la superficie del mercurio, sin evaporarse. Supongamos, pues, que se han introducido algunas gotas de mas. Segun lo que acabamos de decir, la tension del gas ha crecido por efecto del vapor, y se podría calcular su aumento, por la diferencia de nivel del mercurio en ambos brazos; pero el mismo aparato proporciona un medio mucho mas fácil de medirla. Basta abrir la llave inferior R, y dejar salir el mercurio hasta que se halle al mismo nivel en ambos brazos (*). Se cierra entonces la llave R, y se mide el número de divisiones del tubo ocupadas por la mezcla del gas y el vapor. La fuerza elástica de la mezcla es entonces igual á la presion atmosférica como al principio de la esperiencia; pero antes el gas ocupaba distinto número de divisiones. Su fuerza elástica ha variado en razon inversa de los

(*) Supongo que se han introducido algunas gotas demas del líquido, que basten á dar el aumento de vapor que exige la mayor estension del espacio, á fin de que permanezca constante la fuerza elástica del vapor.

espacios que ocupa, de suerte que por medio de esta relacion conocida, se puede determinar su intensidad actual. Se sabe tambien cual seria la fuerza elástica del vapor empleado si se obrase en el vacio á la temperatura de la esperiencia; luego si esta fuerza es la misma en la mezcla, no hay mas que añadirla á la del gas que acabamos de calcular; y la suma de estas dos fuerzas deberá ser igual á la presion actual de la atmósfera, medida por la columna barométrica, lo cual se halla en efecto con la mayor exactitud. Por consiguiente el vapor mezclándose con el gas, conserva la fuerza elástica que le es propia; y asi se confirma la ley enunciada anteriormente, á saber, que en la simple mezcla de los gases con los vapores, cada una de las partes de la mezcla, conserva la fuerza elástica que corresponde á su temperatura actual, y al volúmen que se le hace ocupar.

Conocida y comprobada esta ley puede servir para calcular de antemano el número de divisiones que deberá ocupar la mezcla bajo la presion actual de la atmósfera, suponiendo que el gas seco haya ocupado anteriormente un número conocido de divisiones bajo esta misma presion, pues no hay mas que calcular el volúmen de este gas como si estuviese descargado de una parte de presion, igual á la fuerza elástica del vapor. Por ejemplo, supongamos está igual á 0,63427, como lo es en efecto la del vapor acuoso, á la temperatura de 95.°; supongamos que la presion atmosférica sea 0,7600, y el gas interior despues de la introduccion del vapor, se hallará descargado de 0,63427, es decir, que solo tendrá que sostener 0,7600 — 0,63427, ó 0,12573; y por consiguiente segun la ley de Mariotte, se dilatará en razon de 0,7600 á 0,1257, ó aproximadamente como 6 á 1, es decir, que cuando se haya establecido el nivel en ambos brazos del aparato, el volumen de la mezcla será sestuplo. Se ve, pues, por este modo de obrar, que este volumen

llegaria á ser enteramente ilimitado, si la fuerza elástica del vapor fuese exactamente igual á la presion de la atmósfera. En efecto, si esto se verificase, el aire mezclado con el vapor no sufriria ninguna presion, y deberia dilatarse libremente como si estuviese en el vacío, con tal que á medida que se dilatase continuára formándose el vapor y dilatándose con él.

En las esperiencias anteriores hemos supuesto que se intrducian cantidades de liquido bastante grandes para suministrar la cantida de vapor admisible en el espacio ocupado por el gas; pero si se introduce menos del necesario, el vapor se estiende por todo este espacio del mismo modo que los gases y su fuerza elástica diminuye en la propia razon.

Estas mismas leyes se observan en las temperaturas elevadas, y pueden comprobarse, calentando los aparatos que contienen la mezcla de vapor y gas; pero para que se verifiquen es necesario que los gases no puedan combinarse con los vapores á que se mezclan. Esta escepcion es indispensable, porque á todas temperaturas hay ciertos gases que tienen una afinidad tal con el agua, que se apoderan de los vapores acuosos, conduciéndolos al estado líquido ó al sólido. Tales son, por ejemplo, el gas amoniaco, y el gas hidroclórico: pero es claro que no se puede necesitar el conocimiento del volúmen de semejante mezcla, puesto que no puede subsistir en el estado aeriforme. Sin embargo se puede comprobar aun la ley de Mr. Dalton en estos mismos gases mezclándolos con vapores, con los que no tengan igual afinidad. Tales serian, por ejemplo, respecto al gas amoniaco los vapores del eter, y si existiese un gas que por el contrario redujese al estado líquido los vapores del éter sin producir efecto sobre los vapores acuosos, deberia observarse la ley con estos últimos, y no con los primeros.

Hasta ahora no se ha encontrado medio entre es-

tos dos estremos: ó el gas y el vapor que se mezclan pierden enteramente el estado aeriforme, ó le conservan sin ninguna dilatacion ni contraccion particular que dependa de su naturaleza; y entonces se verifican las leyes anteriores. En este último caso, la cantidad de vapores que puede subsistir en el estado aeriforme, en un volúmen de gas, es siempre exactamente la misma que seria en el vacío á igual temperatura. Si permaneciendo esta constante, se dilata ó contrae la mezcla, la fuerza elástica varía conforme á la ley de Mariotte, en razon inversa del volúmen que se le hace ocupar; pero la del vapor permanece constante, cualquiera que sea el espacio, miéntras haya líquido que evaporar, y es la misma que en el vacío. Si la evaporacion no es completa, la fuerza elástica del vapor aumenta con la presion como la de un gas, hasta que el vapor se condensa lo suficiente para que pueda verificarse la liquefaccion. En todos los casos, las fuerzas del vapor y del gas se reunen para formar la fuerza elástica total de la mezcla. Estos fenómenos son los mismos respecto á todos los gases, y se verifican exactamente como si no hubiese ninguna afinidad sensible entre los gases y los vapores que constituyen una mezcla aeriforme. El único efecto que resulta de la interposicion del gas, entre las moléculas del vapor, es que las impide ceder á la presion esterior, y reunirse en gotas liquidas, como sucederia si estando solas sufriesen la misma presion.

La teoría de Mr. Dalton que acabamos de esplicar, proporciona poder resolver de un modo seguro, y por leyes fundadas sobre la esperiencia, todos los problemas que pueden proponerse respecto á los vapores contenidos en un espacio vacío ó lleno de un gas cualquiera, que permita al vapor conservar su estado aeriforme. Por ejemplo, por medio de estos principios se pueden analizar todos los fenómenos que se verifican en un manómetro en que cambien á un tiempo la presion y la temperatura. Co-

mo esta cuestion es de una aplicacion tan continua en las investigaciones de física y de química, la he resuelto en el tratado general. Solo añadiré aqui, que me parece que Deluc es el primer físico que se ha formado una idea exacta de la formacion de los vapores y de su constitucion, en el estado de aislamiento ó de mezcla. De Saussure habia ya probado antes que Mr. Dalton, que el maximum de vapor que puede elevarse en un espacio dado, no depende sino de la temperatura, y siendo esta igual, es el mismo en el aire que en el vacío.

CAPITULO XV.

De la evaporacion.

Cuando un líquido está espuesto al aire libre, se disipa gradualmente, y este efecto se llama *evaporacion.*

Un gran número de físicos han creido que este fenómeno se producia por una afinidad del aire con el agua; pero las esperiencias de Saussure, de Duluc, y de Mr. Dalton, ofrecen medios de representar todos sus resultados sin recurrir á esta afinidad, y por consiguiente no hay razon para qué admitirla, no habiendo en las esperiencias nada que la enuncie. Hemos visto que un líquido introducido en un espacio vacío ó lleno de aire seco, produce vapores, cuya cantidad en este espacio, solo depende de la temperatura. Si el aire encerrado contiene ya vapores semejantes; pero en menor cantidad que el maximum que conviene á esta temperatura, el líquido introducido no hace mas que completar la cantidad de vapor necesaria para llegar á este maximum. En todo esto no hay otra diferencia entre el aire y el vacío sino la rapidez de la evaporacion que se hace instantáneamente en el vacío, y lentamente en el aire ó en los gases, como si las partículas de estos se opusiesen mecánicamente y por su inercia á la difusion de los vapores.

Aplicando estas leyes á la atmósfera, veremos nacer de ellas todos los fenómenos de la evaporacion. En este caso, toda la atmósfera puede considerarse como la masa de aire encerrada en el manómetro; y el líquido que se espone al aire libre en un vaso, es la gota de agua que se hace evaporar en él. Supongamos la temperatura uniforme en toda esta estension; si se halla ya en ella toda la cantidad de vapor que conviene á esta temperatura, el agua del vaso no se evaporará. Pero por poco que esta cantidad sea menor que el maximum, la evaporacion se verificará; y no siendo el vaso mas que un punto con respecto á la estension de la atmósfera, toda el agua que contiene se disipará enteramente sin aumentar sensiblemente la tension del vapor. La cantidad de vapores que anteriormente existia no producirá otro efecto que el de detener mas ó menos la evaporacion, que será tanto mas rápida cuanto mas próximo se halle el aire al estado de una estrema sequedad.

Establezcamos ahora en las capas de la atmósfera una desigualdad cualquiera de temperatura. Entonces estas diferentes capas podrán contener en el mismo instante cantidades muy distintas de vapor acuoso, que tal vez estarán muy distantes de poseer, y esta desigualdad deberá conservarse á veces mucho mas tiempo que la diferencia de temperatura, á causa de la resistencia que opone el aire al movimiento y division de los vapores. De donde resultará tambien, que el agua se evaporará con mas ó menos prontitud en estos diferentes espacios, segun el grado de sequedad en que se encuentren.

Asi, el problema mas general que puede proponerse respecto á la evaporacion, es determinar la rapidez con que se verifica en cada capa de aire, suponiéndola infinita, conociendo la cantidad de vapor que se halla ya en esta capa, y la cantidad total que puede contener segun su temperatura.

Mr. Dalton ha resuelto este problema con la

misma sagacidad que manifiesta en todos sus trabajos sobre los vapores. Ha tratado primeramente de medir la velocidad de la evaporacion del agua en una atmósfera tranquila y seca, y ha hallado que es proporcional á la fuerza elástica del vapor que se forma. Segun este principio, la evaporacion de un líquido se acelera á medida que se eleva su temperatura; y á temperatura igual, es mas rápida en los líquidos, cuya tension es mayor. Esta ley de proporcion se verifica igualmente respecto á una atmósfera en que existen ya vapores de la misma naturaleza que los que se forman; solo que es menester calcular la velocidad de la evaporacion por la diferencia de las fuerzas elásticas. Estos resultados de Mr. Dalton esplican un gran número de fenómenos, que antes eran inesplicables. Se ve claramente, por ejemplo, porque Deluc ha podido formar termómetros de agua y alcool que presentaban sus indicaciones hasta 100.° y aun mas, estrayendo todo el aire del interior de estos termómetros. Pues hallándose estos líquidos en el vacío, desprendian libre é instantáneamente por su superficie, es decir, por el estremo de la columna elevada en el tubo, toda la cantidad de vapor que podia contener el espacio que estaba sobre ellos; y como el vapor podia exhalarse de esta superficie sin ningun esfuerzo, pues se esparcia en el vacío ó en el vapor ya existente, no habia razon alguna para que se formase tambien en lo interior del líquido. Por tanto este podia continuar calentándose y dilatándose sin agitacion.

Hemos observado ya en los primeros capítulos de esta obra, que cuando una sustancia líquida pasa al estado de vapor por medio de la ebullicion, todo el calor que se le comunica se destruye, y vuelve á aparecer de nuevo cuando el vapor toma otra vez el estado líquido. Las esperiencias acaban de enseñarnos que el vapor se forma á cualquiera temperatura, y que el ser esta mas fria ó mas caliente, hace variar solo el grado de su elasticidad. Segun es-

ta analogía debemos suponer, que en cualquiera temperatura habrá una destruccion de calor al formarse los vapores, y en efecto asi lo hace ver la observacion.

Para convencerse de ello, es necesario aislar la masa líquida sobre que se obra, á fin de precisarla á sacar de sí misma, si no la totalidad, á lo menos la mayor parte del calor que le robe la evaporacion, lo cual producirá necesariamente un descenso en su temperatura. Tal es precisamente el efecto de los vasos esponjosos, llamados *alcarrazas* que se usan en el oriente para enfriar el agua que se ha de beber. Se llenan estos vasos de agua, y se cuelgan en un paraje por donde pase una corriente de aire, por ejemplo, entre dos puertas abiertas. La naturaleza esponjosa del vaso permite que la masa de agua que encierra se evapore por todos los puntos de su superficie. La corriente de aire, llevándose el vapor á medida que se forma, favorece tambien al efecto; resultando de todo una abundante evaporacion, que exige una destruccion correspondiente de calor, destruccion que no puede verificarse sino á espensas del agua, y asi es que baja su temperatura muchos grados.

Un efecto semejante puede producirse envolviendo la bola de un termómetro en una esponja mojada y esponiéndola al sol. Si se observa el grado que este termómetro asi envuelto marca á la sombra, se le ve bajar considerablemente luego que se le pone al sol. Los líquidos que se evaporan con mas rapidez son los que producen un enfriamiento mas sensible, lo cual debe ser asi, puesto que esta misma rapidez les obliga á consumir mayor cantidad de su calor en un tiempo dado. Asi el termómetro baja muchos grados en el éter cuando este líquido se evapora; de donde proviene la viva impresion de frio que se esperimenta derramando algunas gotas de él sobre una parte del cuerpo desnuda. El efecto es aun mucho mas rapido bajo el recipiente de la máquina

neumática, estrayendo rápidamente los vapores á medida que se forman; y si la esperiencia se hace con un termómetro envuelto con una esponja mojada en carburo de azufre, sustancia muy evaporable, el mercurio se hiela en pocos instantes. Se puede suplir á las bombas, colocando bajo el recipiente una sustancia capaz de absorver el vapor á medida que se desprende; por ejemplo, poniendo al lado de un vaso lleno de agua líquida una vasija ancha llena de ácido sulfúrico concentrado. Entonces desde el momento que se estrae el aire para que la evaporacion sea libre, los vapores acuosos son absorvidos luego que se forman; y como esta absorcion da motivo á que se renueven sin cesar el agua de que se exhalan, se hiela en muy poco tiempo. Esta curiosa esperiencia es de Mr. Leslie.

CAPITULO XVI.

De la higrometría.

Es preciso muchas veces en las esperiencias de química y fisica conocer exactamente la cantidad de agua que se halla evaporada en el aire atmosférico, ó en un gas. Si se supiese que esta cantidad era la correspondiente al punto de saturacion, seria muy fácil valuarla, puesto que dada la temperatura, se calcularia su fuerza elástica por la teoría de Mr. Dalton, y su peso por las esperiencias de Mr Gay-Lussac. Pero cuando se ignora en qué estado se halla la atmósfera, ó el gas que se emplea, es preciso buscar otros medios, para valuar la cantidad de agua que se halla en estado de vapor. Tal es el objeto de la parte de la fisica llamada *higrometria*; la cantidad mayor ó menor de vapores acuosos que contienen los gases constituye lo que se llama su *estado higrométrico*; y los instrumentos propios para hacer conocer este estado, se llaman *higrómetros* ó *higróscopos*.

Casi todos los higrómetros se fundan en las variaciones de volúmen que sufren las sustancias orgánicas, por la introduccion ó el desprendimiento de los vapores. Todo el mundo conoce la diferente elasticidad que tiene un pergamino mojado ó seco, las cuerdas de tripa empleadas en los instrumentos músicos cambian de tension y de tono, segun la humedad que tienen; cuando la humedad es mayor se destuercen, y se hacen mas cortas aumentándose su grueso. Las barbas de muchas plantas esperimentan este efecto de un modo tan marcado, que si se fija una de ellas por su base perpendicularmente á un pedazo de carton, y se encola en el otro estremo una tirita de papel perpendicular á su longitud, la torsion que sufre la barbita por las variaciones de humedad y sequedad es suficiente para hacer describir al papel arcos muy grandes. En este principio, aplicado á las cuerdas de tripa, se funda la construccion de las figuritas que indican con sus movimientos la sequedad ó la lluvia.

Entre las sustancias que poseen estas propiedades higrométricas, no hay ninguna tan sensible ni tan constante en sus propiedades como los cabellos cocidos en una disolucion débil de potasa que les quita la grasa que tienen en su estado natural. El cabello, despues de esta preparacion, se acorta con la sequedad, y se alarga con la humedad, lo cual no se opone á que se alargue por el calor, y se contraiga con el frio como todos los demas cuerpos; pero en una cantidad mucho menor. De Saussure se ha servido del cabello preparado de este modo para construir el higrómetro que lleva su nombre, y que ha introducido en las investigaciones de este género una exactitud desconocida hasta su invencion. Este higrómetro está representado en la fig. 66; el estremo superior del cabello está fijo en S, y el estremo inferior unido á la circunferencia de una polea muy movible, tirada hácia arriba por el cabello, y hácia abajo por un pesito; cuando el cabello se acorta,

hace girar la polea en una direccion, y cuando se alarga, el pesito la hace girar en la direccion contraria. La polea hace girar una aguja bastante larga, que moviéndose sobre un arco de círculo graduado, indica las mudanzas que sufre el cabello á consecuencia de las variaciones de humedad del aire que le rodea.

Si se encierra este instrumento en un manómetro lleno de aire, ó de un gas cualquiera, y cuyas paredes esten mojadas con agua, se ve mover la aguja al momento, y anunciar una dilatacion en el cabello, hasta que al fin se fija en cierto punto. Transportándole entonces á otro manómetro, en que esté encerrado el aire desde algunos dias antes con sustancias capaces de absorver la humedad, se ve al momento retrogradar la aguja por un encogimiento del cabello, y detenerse en otro punto. Cualquiera que sea la temperatura á que se opere, con tal que el manómetro esté saturado de vapores acuosos, ó completamente privado de ellos, estos puntos estremos á que se detiene la aguja son siempre los mismos. De Saussure llama á uno de ellos, término de la mayor sequedad, y le marca con 0; y llama al otro término de la menor humedad, y le marca con el número 100; y dividiendo en seguida el arco que comprenden del limbo en 100 partes iguales, cada una de ellas presenta un grado intermedio de humedad.

Hasta aqui este instrumento no es mas que un indicador cómodo y sensible, pues acordándonos de lo que hemos dicho al hablar del termómetro, veremos que para que el higrómetro sea un instrumento comparable, es necesario que tenga ademas otras cualidades. Es preciso 1.º que sea constante en sus indicaciones; 2.º que estando construido siempre bajo los mismos principios, pero con cabellos diferentes, dé siempre los mismos resultados en iguales circunstancias. En fin aun con estas cualidades no haria mas que fijar el estado higrométrico de una

manera capaz de conocerse sin medir la cantidad absoluta de agua contenida en el aire, del mismo modo que el termómetro fija y determina la temperatura; pero no hace conocer la intensidad absoluta del calórico que la produce. Luego para que el higrómetro dé al físico todos los datos que necesita conocer, es preciso aun determinar ya por la esperiencia, ó ya por la teoría, la relacion que hay entre sus grados y las cantidades absolutas de vapor que existen realmente en el aire. De Saussure ha resuelto perfectamente las dos primeras cuestiones; ha probado por medio de esperiencias delicadas, que las indicaciones del cabello son prontas, seguras y constantemente comparables entre sí, cuando está preparado como se debe. Ha visto que ciertos cabellos eran algunas veces irregulares, y ha dado el medio de reconocerlos para desecharlos. Ha examinado qué preparaciones debian hacerse con los otros para que su marcha fuese comparable, cuyos detalles pueden verse en su obra; pero ha sido menos feliz en la investigacion de las relaciones del higrómetro con las cantidades absolutas de agua evaporadas en el aire, y la teoría de los vapores no se hallaba entonces bastante adelantada para que pudiese obtenerlas.

Sabiéndose en el dia cómo, y bajo qué condiciones existen los vapores, tratemos de formarnos una idea de la accion del cabello sobre ellos: y para simplificar el problema, podemos suponer que el cabello obra en el vacío, porque sus indicaciones respecto á la tension de vapores iguales son las mismas en él que en el aire, sin mas diferencia que la de que se establecen instantáneamente. Esto supuesto, la accion del cabello sobre los vapores es enteramente análoga á la de las sustancias desecantes que se introducen en el vacío; y como ellas absorven estos vapores hasta que su afinidad deja de poder pricipitarlos. Pero si en un manómetro que contenga un metro cúbito de aire húmedo, se introduce un

miligramo de potasa ó de muriate de cal, este cuerpo, saturándose de humedad, absorveria una cantidad de vapor tan pequeña, que ni su peso seria sensible en la balanza, ni el vacío producido por su condensacion se notaria en el barómetro. Tal es exactamente el caso en que se halla el cabello, en razon de la poca agua que recibe, de suerte que puede considerarse que no produce ninguna alteracion sensible en el estado higrométrico del aire en que está.

Estudiemos ahora los diferentes grados de absorcion que produce su afinidad. Si se coloca el higrómetro en un espacio completamente saturado de vapores, cualquiera que sea la temperatura, se observa que la aguja se detiene siempre en el mismo punto fijo. Asi el cabello se alarga una misma cantidad en estas diferentes circunstancias, y por consiguiente absorve la misma cantidad de agua. Sin embargo la masa de los vapores existente en el espacio saturado, es muy diferente segun la temperatura; pero tiene una cosa comun, á saber, que en este punto de saturacion, la fuerza mas pequeña basta para reducirlos á agua. La afinidad que tienen con el cabello, es una fuerza de esta especie, y por consiguiente produce su efecto acostumbrado; y como la absorcion que resulta de ella es tan pequeña que no disminuye sensiblemente la tension del vapor que queda en el aparato, se sigue que el cabello debe continuar precipitando este vapor hasta que esté completa y enteramente satisfecha su afinidad con el agua; lo cual manifiesta por qué debe siempre absorver la misma cantidad en cualquier espacio saturado, cualquiera que sea la temperatura: prescindiendo de las variaciones que el calor puede producir en su afinidad con el agua; variaciones que segun resulta de la esperiencia, son enteramente insensibles en la estension de la escala termométrica, á lo menos mientras no se altera la constitucion misma del cabello.

Coloquemos ahora el higrómetro en un espacio que no esté completamente saturado de agua; entonces una fuerza infinitamente pequeña no bastará para precipitar los vapores suspensos en este espacio, puesto que pueden resistir cierto grado de presion y de enfriamiento. Por consiguiente el efecto del cabello sobre estos vapores cesará antes de que esté completamente saturado; porque es una ley general en los fenómenos químicos, que la afinidad que una sustancia tiene con otra aumenta á medida que se le priva de ella, y disminuye á medida que se satura. Cuando el cabello perfectamente seco se introduce en el manómetro, ejerce al principio sobre los vapores acuosos una afinidad muy poderosa para que puedan resistirse á ella; una parte pues de estos vapores se precipita al estado líquido, es absorvida por el cabello y le hace alargar; pero esta misma absorcion disminuye su avidez, y llega un término en que la accion que ejerce sobre los vapores es exactamente igual para el efecto, al grado de presion ó de frio que pueden sufrir sin liquidarse: entonces resisten á su influencia, y cesa la dilatacion del cabello. Asi, pues, indica el grado de saturacion del espacio por el término variable en que su afinidad con los vapores deja de poder precipitarlos. Este límite depende, pues, de la ley segun la cual disminuye la afinidad del cabello con el agua á medida que se le satura. He aqui lo que seria preciso conocer para poder determinar teóricamente la relacion de su aumento de longitud, con las cantidades de agua realmente evaporadas. Pero no teniéndose ninguna nocion sobre esta ley de decrescencia, como sobre la de ninguna de las demas afinidades químicas, es forzoso recurrir á la esperiencia, es decir, multiplicar las observaciones con el higrómetro en circunstancias conocidas para deducir empíricamente la ley de sus indicaciones. Mr. Gay-Lussac lo ha conseguido por un método tan sencillo, como seguro é ingenioso. Habiendo elegido un higró-

metro cuya marcha sea muy constante, es decir, que colocado en las mismas circunstancias, se ponga siempre en el mismo grado de su escala, le cuelga en un gran vaso de vidrio, lleno en parte de agua, ó de una disolucion salina conocida, y cuya tension ha medido anteriormente en el vacío á una temperátura dada. La suspension del higrómetro se hace midiéndole al interior de la tapa del vaso, que es un disco de vidrio plano. Se enloda herméticamente este disco á las orillas del vaso, y se deja asi durante algun tiempo. El líquido esparcido por las paredes del vaso satura el espacio interior de vapores acuosos hasta el término correspondiente á su tension; y el higrómetro, despues de haberse puesto en equilibrio con ellos, acaba por detenerse en un grado de su division. Se sabe, pues, que este grado corresponde á la tension observada del líquido; y repitiendo esta misma prueba á igual temperatura, respecto á diversas tensiones conocidas, comprendidas entre la estrema sequedad y la saturacion completa del espacio por los vapores emanados del agua pura, se pueden obtener los términos de esta correspondencia, tan inmediatos como se quieran.

Este método puede aplicarse, como se ve, con igual éxito á toda especie de higrómetros, y por tanto ofrece un medio escelente de compararlos. Pero Mr. Gay-Lussac no lo ha aplicado hasta ahora mas que al higrómetro de cabello, que siendo, como es, el mas sensible, y acaso el mas exacto, segun la opinion de De Saussure, merecia ser el primer objeto de sus determinaciones. Estudiándole de este modo á la temperatura de 10 grados del termómetro centesimal, ha obtenido una serie de resultados, que añadidos, me han dado las tablas siguientes, en que las tensiones del vapor acuoso inferiores al maximum estan espresadas en centésimos de la tension total. Se puede tambien, sin un grande error, estender el uso de estas tablas á cualquiera otra tempe-

ratura desde o hasta 100.°, tomando por tension total la que convenga á la temperatura de que se trate. Sin embargo, el resultado de esta proporcion indicará una cantidad de vapor un poco pequeña sobre la temperatura de 10.°, y un poco grande bajo esta misma temperatura.

Tensiones del vapor.	Grados del higrómetro de cabello.	Tensiones del vapor.	Grados del higrómetro de cabello.	Tensiones del vapor.	Grados del higrometro de cabello.
0	0,00	41	64,63	82	91,55
1	2.19	42	65,53	83	92,05
2	4,37	43	66,43	84	92,54
3	6,56	44	67,34	85	93,04
4	8,75	45	68,24	86	93,52
5	10,94	46	69,03	87	94,00
6	12.93	47	69,83	88	94,48
7	14.92	48	70,62	89	94,95
8	16,92	49	71,42	90	95,43
9	18,91	50	72,21	91	95,90
10	20,91	51	72,94	92	96,36
11	22.81	52	73,68	93	96,82
12	24,71	53	74,41	94	97,29
13	26,61	54	75,14	95	97,75
14	28,51	55	75,87	96	98,20
15	30,41	56	76,54	97	98,69
16	32,08	57	77,21	98	99,10
17	33.76	58	77,88	99	99,55
18	35,43	59	78,55	100	100,00
19	37,11	60	79,22		
20	38,78	61	79,84		
21	40,27	62	80,46		
22	41.76	63	81,08		
23	43,26	64	81,70		
24	44.75	65	82,32		
25	46.24	66	82,90		
26	47.55	67	83,48		
27	48.86	68	84,06		
28	50.18	69	84,64		
29	51,49	70	85,22		
30	52,81	71	85,77		
31	53,96	72	86.31		
32	55.11	73	86,86		
33	56.27	74	87.41		
34	57.42	75	87.95		
35	58,58	76	88,47		
36	59.61	77	88,99		
37	60,64	78	89.51		
38	61.66	79	90,03		
39	62,69	80	90,55		
40	63,72	81	91,05		

Esta tabla da el grado del higrómetro de cabello, conocida la tension del vapor acuoso que actualmente existe en el aire. La tension del vapor acuoso, respecto al estado de saturacion completa, está representada por 100, y las tensiones menores en partes centesimales de esta unidad. Por consiguiente, si se suponen observadas bajo otra forma, por ejemplo, en milímetros, será necesario multiplicarlas por 100, y dividirlas por 9,475 milímetros, que es la tension total del vapor á la temperatura de 10.° centesimales.

Grados del higrómetro de cabello.	Tensiones del vapor.	Grados del higrómetro de cabello.	Tensiones del vapor.	Grados del higrómetro de cabello.	Tensiones del vapor.
0	0,00	41	21,45	82	64,57
1	0,45	42	22,12	83	66,24
2	0,90	43	22,79	84	67,92
3	1,35	44	23,46	85	69,59
4	1,80	45	24,13	86	71,49
5	2,25	46	24,86	87	73,39
6	2,71	47	25,59	88	75,29
7	3,18	48	26,32	89	77,19
8	3,64	49	27,06	90	79,09
9	4,10	50	27,79	91	81,09
10	4,57	51	28,58	92	83,08
11	5,05	52	29,38	93	85,08
12	5,52	53	30,17	94	87,07
13	6,00	54	30,97	95	89,06
14	6,48	55	31,76	96	91,25
15	6,96	56	32,66	97	93,44
16	7,46	57	33,57	98	95,63
17	7,95	58	34,47	99	97,81
18	8,45	59	35,37	100	100,00
19	8,95	60	36,28		
20	9,45	61	37,31		
21	9,97	62	38,34		
22	10,49	63	39,36		
23	11,01	64	40,39		
24	11,53	65	41,42		
25	12,05	66	42,58		
26	12,59	67	43,73		
27	13,14	68	44,89		
28	13,69	69	46,04		
29	14,23	70	47,19		
30	14,78	71	48,51		
31	15,36	72	49,82		
32	15,94	73	51,14		
33	16,52	74	52,45		
34	17,10	75	53,76		
35	17,68	76	55,25		
36	18,30	77	56,74		
37	18,92	78	58,24		
38	19,54	79	59,73		
39	20,16	80	61,22		
40	20,78	81	62,89		

Esta tabla da las tensiones del vapor que corresponden á los grados del higrómetro, espresadas como en la tabla anterior, en partes centesimales de la tension total.

Cuando se coloca un mismo higrómetro sucesivamente en diversas capas atmosféricas, como puede hacerse con un globo aerostático, se le ve marchar hácia el punto de sequedad, al paso que se separa de la tierra; y elevándose á alturas muy grandes, como ha hecho Mr. Gay-Lussac, la sequedad llega á ser tal, que tuerce y desfigura la madera, el pergamino, y todos los cuerpos que conservan el menor vestigio de humedad. Este fenómeno es tanto mas digno de notarse, cuanto que la temperatura va disminuyendo tambien á medida que se sube; de suerte que llega á ser muy baja en las regiones elevadas del aire, siendo por consiguiente muy pequeña la cantidad de vapores que puede admitir. Se comprende bien el descenso de temperatura considerando que el aire al dilatarse absorve calor de manera que una misma masa de aire transportada de las capas inferiores á las superiores de la atmósfera, tomando de sí misma el calórico oculto correspondiente á su estado de dilatacion; y mas adelante veremos, tratando del rocío, que el mismo aspecto sereno del cielo debe contribuir poderosamente á enfriar las capas mas elevadas de la atmósfera; pero la disminucion rápida de la humedad higrométrica parece mucho mas dificil de concebir.

Sin embargo, admitiendo esta disminucion como un hecho, me parece que se puede esplicar de un modo bastante plausible, porque en nuestros climas de Europa regularmente hace buen tiempo cuando sube el barómetro. Entonces, las nubes que se hubieran podido resolver en lluvia son llevadas á las regiones superiores, donde siendo mayor la sequedad pueden disiparse mas fácilmente. Por el contrario, si baja el barómetro bajan tambien las nubes; y acercándose á la tierra llegan á alturas, en que estando el aire mas próximo al estado de saturacion es mas fácil la precipitacion de los vapores. Segun este modo de ver, el descenso del barómetro debe ser un pronóstico mas seguro que su elevacion, pues

esta, y la ascension correspondiente de las nubes, no contribuirán á evaporarlas, si por causa de un viento elevado, contínuo y húmedo, el espacio está lleno de vapor acuoso á una gran altura. Entonces, depues, podrá suceder que suba el barómetro sin dejar de llover, como sucede alguna vez en nuestros climas, y muy frecuentemente en los trópicos, donde llegando la estacion de las lluvias puede estar lloviendo contínuamente, sin que el barómetro indique un descenso permanente bajo su altura media.

CAPITULO XVII.

Gravedad especifica de los cuerpos.

Hemos necesitado ya muchas veces en nuestras esperiencias conocer el peso de ciertos cuerpos bajo un volúmen dado, por ejemplo, el peso de un litro de aire, ó el de un centímetro cúbico de mercurio. La utilidad de estos resultados, y su frecuente aplicacion en la química y en la física exije que busquemos métodos generales y exactos para determinarlos.

El medio mas sencillo de conseguirlo es medir comparativamente el peso de un volúmen cualquiera de la sustancia dada y el de un volúmen igual de agua. En efecto, si suponemos que ambos se pesan á la temperatura del maximum de condensacion del agua, se sabrá que la sustancia de que se trata es dos, tres, ó *n* veces mas pesada que el agua en igual volúmen. Y como segun el sistema de las medidas métricas cada gramo de agua á esta temperatura ocupa un volúmen de un centímetro cúbico, se tendrá que cada centímetro cúbico de la sustancia propuesta pesa dos, tres, ó *n* gramos, que es precisamente lo que se queria saber. No es tampoco necesario pesar el cuerpo á la temperanura del maximum de condensacion del agua; pero entonces es preciso contar con las dilataciones de este liquido y de la sustancia que se

compara con él. Por esto no podiamos entrar en esta investigaciou de un modo general, antes de haber medido y reducido á fórmulas las dilataciones de los cuerpos.

Este número n, que espresa cuántas veces pesa mas que el agua, la sustancia dada se llama la *gravedad espsifica*, ó mas propiamente el *peso especifico* del cuerpo. Generalmente le supondremos, como acabamos de hacer, con relacion á la temperatura del maximum de condensacion del agua; y entonces, el número n que esprese el peso específico de un cuerpo, espresará tambien el número de gramos que pese un centímetro cúbico de él.

Cuando hemos establecido en el libro primero los principios del equilibrio y del movimiento, hemos llamado *densidad* de un cuerpo la cantidad relativa de materia inerte que contiene eu un volúmen dado; y hemos visto que esta cantidad podia reputarse como proporcional al peso, *para todas las aplicaciones de mecanica*; de suerte, que un cuerpo se dirá que es dos, tres, ó n veces mas denso que otro, segun pese dos, tres, ó n veces mas que el otro en igual volúmen. Asi, considerando como unidad de esta especie la densidad del primer cuerpo, el de cualquiera otra se representará por el número n. En nuestro sistema de medidas, la unidad mas conveniente de densidad es la del agua á la temperatura del maximum de condensacion; y en este caso *la densidad de cualquiera cuerpo es igual á su gravedad especifica.* Adoptaremos en general esta convencion.

Concibamos ahora una masa de agua, que reducida á su maximum de condensacion, contenga un número V de centímetros cúbicos: V espresará igualmente su peso en gramos. Pero esta espresion no será rigorosamente exacta mas que para el paralelo de la tierra, respeto al cual se ha determinado el gramo: porque siendo desigual la energia de la gravedad, segun las diferentes latitudes, la misma masa

de agua tomada sucesivamente en distintos paralelos, tiene pesos muy diferentes; y si se quiere referir siempre este peso al grado primitivo, considerado como invariable, su espresion variará en razon de las intensidades de la gravedad en ambos sitios. Representemos, pues, por 1 esta intensidad, respecto al sitio en que se ha determinado el gramo, esto es, París: su valor, respecto á cualquiera otro punto de la masa, se espresará por otro número mayor ó menor, que nos harán conocer las observaciones del péndulo, segun hemos esplicado en el libro 1.º, y cuya espresion analítica puede verse en el tratado general. Multiplicando el volúmen primitivo V por este número, el producto espresará el peso de la misma masa de agua en gramos á una latitud cualquiera, siendo siempre idéntico á la primera determinacion el peso de cada gramo.

Si se quiere espresar del mismo modo el peso P de un volúmen igual de cualquiera otro cuerpo se multiplicará el peso anterior de la masa de agua por la gravedad específica de este cuerpo. En este sentido se dice que *el peso de un cuerpo es igual al producto de su densidad y de su volúmen por la gravedad*; pero es menester no olvidar que en esta fórmula, el peso, la gravedad. el volúmen y la densidad no espresan cantidades absolutas, y solo son números abstractos, relativos á sus unidades respectivas.

Establecidos estos principios generales vamos á entrar en el pormenor de las esperiencias propias para determinar el número *n* en los diferentes estados de los cuerpos.

CAPITULO XVIII.

Modo de obtener la gravedad específica de los gases.

Siendo muy pequeñas las densidades de todas las sustancias gaseosas, conviene para hacer mas sensibles sus diferencias referirlas á alguna de ellas; y para esto elejiremos el aire atmosférico, que segun la observacion general de los físicos y químicos es de la misma naturaleza en todos los climas de la tierra y en todas las estaciones.

Para medir el peso de un mismo volúmen de aire y de gas, se toma una esfera de vidrio, cuya capacidad sea á lo menos de cinco ó seis litros, á fin de que los errores no tengan demasiada influencia sobre los resultados, como sucederia si se hiciesen las esperiencias con volúmenes demasiado pequeños. Esta esfera debe estar cerrada con una llave muy bien trabajada, que intercepte toda comunicacion entre el interior de la esfera y el aire atmosférico. Atornillada la esfera sobre el platillo de una buena máquina neumática se forma el vacío, que para mayor sencillez supondremos que es perfecto; de suerte que se haya estraido todo el aire que habia interiormente. Entonces se cierra la llave, se destornilla la esfera, y se pesa en este estado en balanzas muy exactas. (*) Sea P el peso obtenido de este modo.

Hecha esta operacion, se abre con cuidado la llave sin quitar la esfera de la balanza; el aire esterior entra y la llena, y entonces se pesa de nuevo

(*) Para hacer esta operacion no se coloca la esfera en los platillos de la balanza, lo cual seria muy incómodo, pues habria que darles grandísimas dimensiones, sino se engancha la esfera á la balanza por medio de un hilo de cobre, cuyos estremos estan doblados formando gancho. Uno se fija á la parte inferior de uno de los platillos de la balanza, y el otro entra en un anillo que termina la parte superior de la llave de la esfera, fig. 67.

con la llave abierta. Constantemente se halla que este peso es mayor: supongamos que sea P.$''$

Es evidente que el aumento de peso de la esfera proviene del aire introducido en ella, y por consiguiente es igual al peso de este aire. Asi, pues, el esceso del segundo peso sobre el primero, ó $P''—P$, espresará el peso del volúmen de aire atmosférico que contiene la esfera en las circunstancias de aquel momento.

Del mismo modo se procede para conocer el peso de igual volúmen de otro gas. Se empieza buscando el peso de la esfera vacía que supondremos es π, pudiendo ser diferente de P, á causa de la variacion de densidad del aire que desaloja. Hecha esta operacion, se llena de gas, con todas las precauciones necesarias para asegurarse de su pureza. Despues se cierra, se pesa de nuevo, y siempre se le halla mas pesado. Sea π'' su nuevo peso.

Es claro que la diferencia $\pi''—\pi$ es el peso del gas introducido en él; y que la relacion $\frac{\pi''—\pi}{P''—P}$ es la gravedad de este gas comparada con la del aire atmosférico en las circunstancias en que se ha hecho la esperíencia.

Pero haciéndola diferentes dias con el mismo aire, el mismo gas, la misma esfera, la misma máquina neumática y las mismas balanzas, se hallan contínuamente distintos resultados; lo cual prueba que estas observaciones, aunque exactas, no son comparables entre sí, y que para serlo necesitan sufrir algunas correcciones que vamos á esplicar.

Desde luego sabemos que la presion atmosférica no es constantemente la misma; y como obra sobre el aire contenido en la esfera al pesarla llena y abierta, ha de variar la densidad de este aire, asi como su peso, segun sea la presion mas ó menos considerable. He aqui una primera causa de variacion que nos es forzoso correjir.

La temperatura produce tambien un efecto se-

mejante; porque ya suba, ya baje, dilata el aire ó le condensa, permaneciendo la misma la presion; será, pues, necesario, observarla igualmente y contar con ella en los resultados.

Las mismas causas influirán tambien en el peso de los otros gases cuando se introduzcan en la esfera despues de haber formado el vacío; siendo preciso, por tanto, contar con la presion y temperatura á que se introducen.

La esfera misma no tiene siempre igual capacidad; porque el vidrio de que está hecha se dilata ó contrae, segun sube ó baja la temperatura; y entonces su volúmen aumenta ó disminuye; variaciones, que tambien deben tenerse presentes.

En fin, hemos visto que el aire y todos los demas gases pueden contener cierta cantidad de vapores acuosos, que varía segun la temperatura, y la mayor ó menor desecacion que ha sufrido el gas. Un mismo volúmen de gas tendrá diferentes pesos, segun contenga mas ó menos vapor acuoso, que se haya sustituido á una porcion de su masa. Será, pues, preciso para hacer comparables los resultados conocer la cantidad de vapores acuosos que entran en los gases, igualmente que en el aire atmosférico que se pesa, y contar con ella en los resultados, ó bien destruirlos enteramente, absorviéndolos por medio de los álcalis.

Todas las causas que acabamos de examinar influirán tambien sobre las esperiencias de otro modo, modificando el aire esterior en que la esfera está sumerjida al pesarla, puesto que un cuerpo sumerjido en un fluido pesado pierde una parte de su peso, igual á la del volúmen de fluido que desaloja. Así que, la pérdida de peso de la esfera, ya llena, ya vacía, al pesarla en el aire variará en razon del volúmen de la esfera, de la presion atmosférica, la temperatura y el estado higrométrico del aire esterior.

Hemos supuesto que la máquina neumática pro-

ducia un vacío perfecto; lo cual jamás se verifica, pues por mucho cuidado que se tenga para estraer el aire del interior de la esfera, queda siempre en él una pequeña cantidad de vapores elásticos, cuya existencia se ve por la presion que ejercen sobre el barómetro que comunica con el interior de la máquina. Deberemos, pues, medir esta presion, y saber si es producida por algun pequeño resto de aire ó de vapores acuosos, ó por la mezcla de estas dos sustancias.

Con todos estos datos se pueden calcular los pesos del aire atmosférico y del gas contenidos en la esfera á la temperatura del hielo al derretirse, y bajo la presion 0,76 metros, estando uno y otro privados de vapores acuosos. Conociendo ademas el volúmen de la esfera en litros ó partes de litro, se podrá deducir cuánto pesa un litro de cada gas. En el tratado general se hallarán todas las fórmulas necesarias para efectuar completamente estas reducciones y la indicacion de todos los métodos que pueden hacer exactas las esperiencias. No pudiendo esponer aqui todos estos pormenores, me limitaré á dar como consecuencia una regla muy simple y exacta, y cuyos resultados son independientes del estado higrométrico del aire esterior. Solo exije que la esfera de que se hace uso se haya secado bien por la parte interior por medio de algunas sales alcalinas, antes de pesarla vacía y llena de aire ó de gas.

En este supuesto, obsérvese la pequeña tension θ que marca la probeta de la máquina neumática al hacer el vacío en la esfera, que debe ser lo mas exactamente que sea posible. Pésese en seguida en tal estado, y llámese P su peso aparente. Hecho esto, introdúzcase en él el gas, y obsérvese la presion interior p' en el momento de volver la llave para encerrarle; $p'-\theta$ será la parte de presion que el gas sufre en la realidad. Sea t' su temperatura. Obsérvese de nuevo el peso aparente P'' de la esfera llena de gas: fórmese en ella otra vez el vacío hasta la

tension θ que tenia anteriormente, y búsquese su nuevo peso P'''; esto supuesto, la espresion $P'' - \frac{1}{2}(P + P''')$ será el peso exacto del gas seco en las circunstancias de su introduccion, es decir, á la temperatura t', bajo la presion $p' - \theta$, y con respecto al volúmen actual de la esfera; y no faltará mas para hacer comparables los resultados que reducirlos á una presion y á una temperatura constantes, por ejemplo, á 0.° y á 0,76 metros, como hemos esplicado en el capítulo 10. Pero si se quiere observar la mayor exactitud, se reducirá el volúmen actual de la esfera á un término fijo, contando con la dilatacion del vidrio. Por medio de semejantes operaciones, ú otras equivalentes, se ha formado la tabla que sigue:

Tabla de la gravedad específica de los gases y de algunos vapores comparados con la del aire, tomada esta por unidad.

SUSTANCIAS.	DENSIDADES determinadas por la esperiencia.		DENSIDADES calculadas segun la proporcion de los elementos y la contraccion del volúmen.	
Aire atmosférico.	1,00000.	Biot y Arago.		
Gas oxígeno. . .	1,10359.			
Gas azoe.	0,96913.			
Gas hidrógeno. .	0,07321.			
Gas ácido carbónico.	1,51961.			
Gas amoniaco. . .	0,59669.	. . . .	0,59438.	3 hidr. y 1 az. contr. ½ del vol. tot. de los compensadores.
Gas hidroclórico.	1,24740.			
Cloro.	2,470.	Gay y Tenard.	2,421.	Suponiendo que 1 de cloro y 1 de hidr. hacen 2 de gas hidroclórico.
Gas óxide carb.	0,9569.	Cruikshanks.	0,96782.	Suponiendo que 1 de ácido carb. menos ½ oxígeno hacen 1 de este gas.
Protóxide de az.	1,5204.	Colin.	1,52092.	Contrac. igual al vol. del oxígeno.
Deutóxide de az.	1,0388.	Berard.	1,03636.	Contrac. ninguna.
Gas hidrógeno sulfur.	1,1912.	Gay y Tenard. . . .		
Gas ácido sulfur.	2,1204.			
Gas oléfico. . . .	0,97804.	Th. de Saus.		
Gas fluobórico. .	2,3709.	John Davy. .		
Gas fluosilícico. .	3,5737.			
Gas clorocarbon.	. . . .		3,3888.	Segun J. Davy.
Gas euclórico. . .	. . . .		2,3782.	Suponiendo 4 de cloro y 2 de oxígeno condensado ⅙
Gas hidriódico. .	4,443.	Gay.	4,4288.	
Vapor de agua.	0,62349.	. . . .	0,624.	Suponiendo que 2 de hidr. y 1 de oxíg. dan 2 de vapor.
Vapor de alcool puro. .	1,6133.	Gay.		
Vapor de eter sulfúrico.	2,5860.			
Vapor de eter hidriódico.	5,4749.			
Vapor de esencia de trementina.	5,0130.			
Vapor de carbono de azufre. . . .	2,6447.			
Vapor de iodo.	. . . . . .		8,6195.	
Vapor de eter hidroclórico . . .	2,219.	Tenard. . . .		

Añadiremos aqui la siguiente tabla de los pesos absolutos de algunos de estos gases, suponiéndolos perfectamente secos.

NATURALEZA de los gases.	Peso de un centímetro cúbico en gramos á la temperatura del hielo al derretirse, y bajo la presion de 0,76 observado a la latitud de 45.°
Aire atmosférico. . .	0,001299075
Oxígeno.	0, 001433530
Azoe.	0, 001258972
Hidrógeno	0, 0000951053
Gas ácido carbónico.	0, 001974088
Gas hidroclórico. . .	0, 001619943
Gas amoniaco.	0, 000775145
Vapor de agua. . . .	0, 000810249

Si se quiere obtener el peso de un litro de estos mismos gases, se multiplicará por 1000 el número que le corresponda, puesto que el litro contiene 1000 centímetros cúbicos. El peso del vapor acuoso que se encuentra en la tabla corresponde á una circunstancia matemática; pues este vapor no podria subsistir en el estado aeriforme, á la temperatura del hielo al derretirse, y bajo la presion de 0,26; pero este dato es útil para los cálculos, porque se puede partir de él como de un término fijo, para calcular el peso de un centímetro cúbico de este vapor á cualquiera otra temperatura, y bajo cualquiera otra presion dada y observada realmente. El cálculo es absolutamente el mismo que para un gas seco, como hemos hecho ver en los capítulos 10, 13 y 14.

Las tablas anteriores hacen ver que muchas sustancias aeriformes son menos pesadas que el aire at-

mosférico en igualdad de volúmen. Si nos imaginamos un volúmen dado de una de estas sustancias, por ejemplo, de gas hidrógeno, encerrado por una cubierta sin gravedad, y abandonando á sí mismo en la atmósfera, tratará de bajar por su propio peso; pero será impelido hácia arriba por una fuerza igual al peso del volúmen de aire que desaloja; y así este volúmen de gas subirá en el aire hasta llegar á capas, cuya densidad sea menor que la suya; y aun se podrá, dándole grandes dimensiones, hacer su fuerza de ascension bastante grande para llevar consigo una cubierta pesada, y aun una barquilla y hombres. Tal es el principio de los globos acrostáticos, cuya invencion, una de las mas bellas del siglo 18, se deve á Montgolfier.

El primer globo fué arrojado por Montgolfier y su hermano en Annonay en 1782; era esférico, y tenia 110 pies de circunferencia. La cubierta era de papel, y la sustancia aeriforme empleada era el mismo aire atmosférico, dilatado por el calor de un horno colocado bajo el orificio inferior del globo. Este se elevó á la altura de mil toesas.

Poco despues se repitió en Paris la esperiencia; y algunos hombres atrevidos se resolvieron á subir en una débil barquilla, manteniendo ellos mismos el fuego que los hacia elevar. Hasta entonces el globo habia estado siempre sujeto con cuerdas; mas al fin Pilatre, Desrosiers y Darlandes subieron á globo libre, y recorrieron en 17 minutos una distancia de cuatro mil toesas.

Esta especie de globos era de un manejo peligroso y dificil; peligroso, porque el fuego mantenido en la barquilla podia comunicarse á la misma barquilla ó á las paredes del globo; y dificil, por la necesidad de aumentar el fuego cuando se queria subir, y disminuirle cuando se queria bajar; operaciones que por su misma naturaleza no pueden arreglarse exactamente.

Mr. Charles tuvo la idea feliz de emplear el gas

hidrogeno, cuya densidad, siendo como $\frac{1}{13}$ de la del aire atmosférico, debia dar una fuerza de ascension considerable y siempre constante, sin que costase ningun trabajo el mantenerla. La dificultad era hallar una cubierta poco pesada y que fuese impenetrable á este gas. Despues de varias esperiencias, Mr. Charles, eligió el tafetan, dado de un barniz hecho con goma elástica, disuelta en caliente en aceite de trementina. Este método produjo un efecto asombroso; M.M. Charles y Robert subieron los primeros de esta manera en las Tullerías, en un globo aerostático de 26 pies de diametro, y recorrieron en pocos minutos un espacio de 9 leguas. Entonces bajó Robert, y quedando Mr. Charles solo en la barquilla, se elevó de nuevo por el aire con la rapidez de una flecha hasta la altura de 1750 toesas.

El viajero modera á su gusto la altura en los globos de gas hidrógeno. Para esto lleva consigo algunos sacos llenos de arena; y cuando quiere subir arroja una parte de ella, con lo cual se hace mas ligero. Por el contrario, cuando quiere bajar deja salir una pequeña cantidad del gas que contiene el globo, y se hace mas pesado. Esta operacion se facilita por medio de una válvula que tiene el globo en su parte superior, la cual se abre por medio de una cuerda, cuyo estremo llega á la barquilla. Esta cuerda constituye la seguridad del viajero, pues si no pudiera abrir la válvula, llegaria á ser el juguete de su globo, y correria el peligro de elevarse á tal altura, que el globo reventaria por la dilatacion del gas. Es preciso, pues, asegurarse por sí mismo de que esta cuerda es fuerte, que está bien asida á la válvula, y que la abre y cierra con facilidad. Tambien es bueno para mayor seguridad que haya dos cuerdas semejantes sujetas á la válvula.

Por otra parte, cualquiera que sea la altura á que se quiera subir, no conviene nunca deshacerse de todo el lastre, porque cuando se abre la válvula para bajar, el globo, haciéndose mas pesado, baja

por el aumento de peso, y baja como cualquiera otro cuerpo grave sin ser detenido en su caida mas que por la resistencia del aire. Asi es que si se le abandona á sí mismo, adquiere una velocidad que es muy peligrosa al llegar á tocar á tierra, y es preciso prevenir este choque arrojando poco á poco el lastre que se ha conservado. Esta diminucion sucesiva de peso compensa en parte la aceleracion de la gravedad, y conduce el globo tranquilamente hácia la tierra, permitiendo aún al viajero que se detenga á una pequeña distancia de su superficie si ve que ofrece algun peligro el paraje á donde baja el globo.

Es inútil y aun peligroso llenar enteramente el globo en el momento de partir, porque á medida que se eleva en la atmósfera, se llega á capas de aire donde la presion es mucho menor que en la superficie de la tierra. Por consiguiente el aire contenido en el globo se dilata; y si estuviese lleno desde luego, seria preciso hacerle salir. En lugar de esto, suponiendo que el globo no esté lleno á la superficie de la tierra, sino que solo contenga la mitad del gas que puede contener, y que esto baste para llevar la barquilla y lo que ella contiene, á medida que se eleve se dilatará el gas interior para ponerse bajo la misma presion que el aire atmosférico. Este se hace cada vez menos pesado; pero como el volúmen del globo aumenta precisamente en la misma razon, compensa aquella diminucion, y por lo mismo la fuerza de ascension en este aire enrarecido es la misma que en el instante de partir. Tampoco la alterará la diminucion de temperatura que se nota al paso que se eleva, porque dilatándose igualmente todos los gases, el efecto será el mismo sobre el gas contenido en el globo que sobre el aire atmosférico que le rodea, pues su temperatura será la misma.

Mr. Charles ha sido el primero que ha hecho esta observacion sobre la inutilidad de llenar el globo al tiempo de partir, habiéndola aprovechado Mr. Gay-Lussac y yo en el viage aereostático que hemos hecho

con motivo de investigaciones de fisica, de que hablaré mas adelante. Nuestra fuerza de ascension en el momento de partir era muy pequeña, en cuanto bastaba para elevarnos con nuestros instrumentos, y se media por medio de una romana colocada bajo la barquilla, y sujeta en tierra. Tomamos el lastre necesario para conducirla al principio al grado que habiamos proyectado, y que me parece era un kilógramo: entonces nos abandonamos á esta fuerza, que nos elevó lentamente hasta 4000 metros de altura. Otro viaje, hecho en el mismo globo por Mr. Gay-Lussac solo, le elevó á la altura de 7000 metros, que es la mayor á que se ha llegado hasta ahora.

En el dia solo se usa el globo de gas hidrógeno, sin que haya producido buen efecto ninguna de las modificaciones que se han intentado hacer en él. Pilatre Desvosiers quiso, sin saber por qué, combinar este medio con el del aire dilatado por el fuego, y empleaba dos globos colocados uno sobre otro, lleno el superior de gas hidrógeno, y el inferior de aire atmosférico dilatado, lo cual era lo mismo que colocar un horno debajo de un almacen de pólvora. Pilatre Desrosiers ha muerto víctima de su invencion. Otro fisico italiano, Zambeccari, ha muerto tambien despues de una multitud de tentativas constantemente infructuosas. A pesar de estos funestos ejemplos se puede asegurar que observando con cuidado las precauciones que acabamos de esplicar, los viajes aereostáticos no ofrecen en el dia absolutamente ningun peligro.

CAPITULO XIX.

Medida de la gravedad especifica de los liquidos.

Para determinar el peso específico de los líquidos, del mismo modo que el de los demas cuerpos, es necesario pesar dos volúmenes iguales de agua y de aquel liquido, reducir este peso á lo que seria en

el vacío y á la temperatura del maximum de condensacion del agua, y dividirlos uno por otro.

Para obtener la igualdad de volúmenes se hace uso de un frasco tapado con un tapon esmerilado, que se llena sucesivamente de agua y del líquido que se quiere pesar. Se empieza determinando exactamente el peso del frasco vacío por el método de las dobles operaciones; en seguida se pesa del mismo modo, lleno de agua destilada á una temperatura conocida; y restando el primer peso del segundo, se tiene el peso aparente E del agua que encierra el frasco á esta temperatura. Entonces se llena del líquido que se quiere examinar, cuya temperatura se observa tambien exactamente, y se determina del mismo modo el peso aparente L del volúmen de este líquido encerrado en el frasco. Con estos datos, y las leyes de la dilatacion del líquido observado, se puede calcular su peso específico.

Nada seria mas facil de hacer si se quisieran despreciar todas las reducciones, es decir, si se quisieran emplear directamente los dos pesos, como si estuviesen tomados en el vacío, y á la temperatura del maximum de condensacion, pues entonces la relacion $\frac{L}{E}$ seria el peso específico. Asi, suponiendo, por ejemplo, que el líquido observado fuese éter, y que el frasco contuviese 39,184 gramos, conteniendo 50,3 gramos de agua, la gravedad específica de este éter seria $\frac{30,184}{50,3}$ ó 0,779. Esto es lo que se hace comunmente; pero es claro que este modo de proceder solo da una aproximacion que no puede emplearse en investigaciones delicadas.

Para obtener la verdadera gravedad específica por el método mas simple y mas directo, es preciso mirar el peso del agua hecho en el frasco, como únicamente destinado á calcular su capacidad; con lo cual la segunda operacion dará el peso de un centímetro cúbico del líquido á una temperatura cual-

quiera. Si se quiere sacar de aqui su gravedad específica, no habrá mas que reducir este peso por medio del cálculo á la temperatura del máximum de condensacion del agua. En el tratado general he dado todas las fórmulas necesarias para hacer estas reducciones; y aplicándolas á pesos muy exactos del agua, del mercurio y del aire atmosférico, he deducido los resultados siguientes, que son de una continua aplicacion.

Peso de un centímetro cúbico de mercurio á 0.°	13,8 597190
Relacion de los pesos del mercurio y del agua en igual volúmen á la temperatura de 0.°.	13,598207
Relacion del peso del mercurio con el del áire atmosférico seco bajo la presion de 0,76 metros, y á la temperatura de 0.°.	10466,82

Si se quisiesen obtener los pesos de un centímetro cúbico de las mismas sustancias respecto á otra temperatura que 0.°, seria necesario reducir estas valuaciones en proporcion á la dilatacion de cada sustancia. Hemos dado ya las del aire y del mercurio, que son sensiblemente constantes en la estension de la escala termométrica. La del agua, que es muy variable, se hallará en la tabla siguiente, en que las temperaturas estan espresadas en grados del termómetro de Reaumur.

Temperatura del agua.	Volúmenes.	Densidades.	Temperatura del agua.	Volúmenes.	Densidades.
0	1,00000000	1,0000000	40	1,01229490	0,9878544
1	0,99995523	1,0000447	41	1,012928[illegible]	0,9872370
2	0,9999[illegible]058	1,0000694	42	1,0135749[illegible]	0,986[illegible]369
2,736	0,99992521	1,0000746	43	1,01423514	0,9859646
3	0,99992589	1,0000739	44	1,01490866	0,9853103
4	0,99994099	1,0000593	45	1,0155953[illegible]	0,9846441
5	0,99997571	1,0000241	46	1,0162949[illegible]	0,9839665
6	1,00002990	0,9999700	47	1,01700[illegible]	0,9832771
7	1,00010340	0,9998976	48	1,0177324[illegible]	0,98257[illegible]
8	1,00019604	0,9998041	49	1,0184699[illegible]	0,9818648
9	1,00030766	0,9996925	50	1,0192198[illegible]	0,9811425
10	1,00043809	0,9995620	51	1,0199818[illegible]	0,9804094
11	1,00058718	0,9994131	52	1,0207558[illegible]	0,9796660
12	1,00075476	0,9992457	53	1,021541[illegible]	0,9789124
13	1,00094067	0,9990600	54	1,02233925	0,9781423
14	1,00114174	0,9988564	55	1,0231482[illegible]	0,97[illegible]754
15	1,00136682	0,9986350	56	1,02396862	0,9765923
16	1,00160674	0,9983938	57	1,02480016	0,9758003
17	1,00186435	0,9981390	58	1,02564272	0,9749982
18	1,00213946	0,9978650	59	1,02649615	0,9741877
19	1,00243194	0,9975739	60	1,02730024	0,9733683
20	1,00274116	0,9972663	61	1,0282348[illegible]	0,9725403
21	1,00306829	0,9969411	62	1,02911988	0,971[illegible]0[illegible]0
22	1,00341185	0,9965997	63	1,03001508	0,9708595
23	1,00377212	0,9962419	64	1,03092034	0,9700071
24	1,00414893	0,9958681	65	1,03183547	0,9691467
25	1,00454211	0,9954783	66	1,03276031	0,9682788
26	1,00495152	0,9950729	67	1,03369472	0,9674035
27	1,00537698	0,9946517	68	1,03463853	0,9665212
28	1,00581832	0,9942154	69	1,03559156	0,9656317
29	1,00627540	0,9937637	70	1,0365536[illegible]	0,9647353
30	1,00674805	0,9932970	71	1,03752464	0,9638326
31	1,00723610	0,9928159	72	1,03850440	0,9629232
32	1,00773939	0,9923200	73	1,03949272	0,9620076
33	1,00825777	0,9918098	74	1,04048948	0,9610860
34	1,00879106	0,9912856	75	1,04149451	0,9601585
35	1,00933910	0,9907473	76	1,04250755	0,9592256
36	1,00990174	0,9901952	77	1,04352856	0,9582872
37	1,01047881	0,9896298	78	1,04455740	0,9573433
38	1,01107014	0,9890512	79	1,04559357	0,9563945
39	1,01167558	0,9884592	80	1,04663760	0,9554406

De la areometria.

Cuando no es necesaria una grande exactitud, se puede determinar la gravedad específica de los líquidos por medio de un instrumento bastante cómodo inventado por Farenheit, que le ha dado el nombre de *areometro*, y está representado en la fig. 68. Este instrumento está hecho de vidrio, ensanchado en la parte inferior, y terminado en la superior por un tubo de muy poco diámetro. Una pequeña cantidad de mercurio encerrada en la bola B, hace que el centro de gravedad del instrumento se halle mucho mas bajo que su centro de volúmen; de donde resulta que sumergido en un fluido pesado, se tiene derecho y en equilibrio sin poderse caer jamás. Sobre el cuello CC del instrumento está marcada una línea muy fina T, precisamente en el punto hasta donde se sumerge el instrumento en el líquido mas ligero cuya gravedad se quiere examinar, por ejemplo, en el éter. Sumergiéndole, pues, en un líquido mas pesado, como el agua, no se introducirá hasta la señal T; y para conducirle hasta este punto será necesario añadir peso al platillo F. Ahora bien, flotando de este modo el instrumento, la fuerza que le sostiene es, segun las primeras leyes de la hidrostática, igual al peso del volúmen de líquido que desaloja. Este volúmen es constante en todas las esperiencias, puesto que el cuello está siempre sumergido hasta el punto T; pero el peso varía segun la naturaleza del líquido, y es igual al peso propio del instrumento que suponemos conocido, ademas de los pesos adicionales que ha sido necesario poner en él. Luego por medio de esta observacion se conocen los pesos de un mismo volúmen de los diferentes líquidos que se esperimentan; pudiéndose deducir sus gravedades específicas dividiéndolos por el peso del mismo volúmen de agua que se haya observado igualmente.

Para hacer estas comparaciones exactamente rigorosas es necesario hacer las esperiencias á la temperatura del máximum de densidad del agua, ó deducirlas por el cálculo, segun las leyes de dilatacion de los líquidos que se hayan observado. En el tratado general he dado todas las fórmulas necesarias para este objeto.

En vez de hacer entrar el areometro hasta un punto fijo T por medio de pesos adicionales, se pueden deducir las densidades de los líquidos por la observacion de los volúmenes que desaloja en éllos, dejándole sumergir *únicamente* por su propio peso; porque conociendo el peso y el volúmen de la parte sumergida, se sacará por una simple proporcion el peso de un volúmen determinado. Por ejemplo, si el volúmen sumergido es en un líquido 16 centímetros cúbicos, y en otro 32, es claro que 32 centímetros cúbicos de este, pesan lo mismo que 16 del otro. En general, obrando de este modo *bajo pesos iguales*, las densidades serán recíprocamente proporcionales á los volúmenes desalojados por el areometro. Resta, pues, graduarle de modo que se conozcan estos volúmenes. Para esto es preciso que su cuello sea perfectamente cilíndrico; se pesa, y se señala exactamente el punto T hasta donde se introduce por su propio peso en el agua á la temperatura del máximum de condensacion. Entonces su peso espresado en gramos dará el volúmen de la parte sumergida en centímetros cúbicos. Hecho esto, se añade peso al platillo F, de suerte que el instrumento se introduzca mas, y se marca igualmente el punto á donde llega: el peso adicional, añadido al propio del instrumento, dará el volúmen de la parte sumergida en este caso; y restando de él el primero, se conocerá el volúmen de la parte de cuello comprendida entre los dos puntos. Por consiguiente, siendo este cuello perfectamente cilíndrico, no habrá mas que dividir este intervalo en un número cualquiera de partes iguales que corresponderán á

otras tantas partes de igual volúmen, cuya relacion con el volúmen primitivo será conocida. Supongamos, por ejemplo, que cada division sea $\frac{1}{1000}$ de él; entonces representando por 1000 el volúmen de la parte del instrumento sumergida por su propio peso hasta la señal T en el agua destilada, cuando se sumerja en cualquier otro líquido hasta la segunda division T', ó hasta la tercera T'', ó hasta la cuarta T''', se sabrá que los volúmenes que desaloja son 1001, 1002, 1003, y asi sucesivamente; de donde se inferirá que la densidad del líquido con relacion al agua estará en razon inversa, esto es, sera $\frac{1000}{1001}$, $\frac{1000}{1002}$ ó $\frac{1000}{1003}$. Aun se puede ahorrar por un medio muy sencillo la reduccion de estas fracciones, hallando desde luego la densidad en milésimas. Para esto bastará hacer desiguales las divisiones del cuello, marcando la primera T' á una distancia de T que comprenda, no $\frac{1}{1000}$, sino $\frac{1}{999}$ del volúmen primitivo, la segunda T'' á $\frac{2}{998}$, la tercera T''' á $\frac{3}{997}$, y asi sucesivamente, escribiendo al lado de cada division el número 999, 998, 997 que ha servido para trazarla. Por este medio, á cualquier punto T', T', T'' del cuello á que llegue el líquido, el volúmen total de la parte sumergida estará espresado exactamente por 1000; y el volúmen primitivo, limitado por el punto T, lo estará por el número de la division á donde llega; y asi la densidad será $\frac{999}{1000}$, $\frac{998}{1000}$, $\frac{997}{1000}$, teniendo siempre por denominador 1000. De este modo se pueden hacer colecciones de areómetros, cuyas divisiones alcancen desde las menores densidades hasta las mas grandes que pueden observarse.

CAPITULO XX.

Gravedad específica de los cuerpos sólidos.

El método que hemos esplicado para hallar el peso específico de los líquidos puede igualmente ser-

vir para hallar el de los cuerpos sólidos insolubles en el agua. Para esto basta que el cuerpo pueda introducirse en un frasco, ú otro vaso cualquiera que pueda cerrarse exactamente; y no es necesario que esté en un solo pedazo, pues puede hallarse, aunque sea en polvo finísimo. El modo mas sencillo de hacer la esperiencia es el siguiente:

Se determina exactamente el peso del cuerpo en el aire, que llamaremos S, observando el barómetro y el termómetro en el momento de pesarle; en seguida se llena el frasco de agua destilada, tomada á una temperatura conocida; se coloca el cuerpo con el frasco lleno en uno de los platillos de la balanza, y se ponen en el otro los pesos necesarios para restablecer el equilibrio. Hecho esto se abre el frasco, y se introduce en él el cuerpo, que hace salir una parte de agua, y se cierra en seguida, cuidando de que no quede nada de aire en su interior. Se enjuga exactamente, y se vuelve á colocar en el mismo platillo de la balanza, el cual está mas ligero por el peso del agua que ha desalojado el cuerpo. Se añade en él el peso necesario para establecer el equilibrio, y se conoce el peso E de esta agua: conociéndose tambien de antemano el peso aparente S del cuerpo en el aire, se puede calcular su peso específico con estos datos y las leyes de la dilatacion de este cuerpo.

Aqui, lo mismo que respecto á los líquidos, el resultado se presenta desde luego si se quieren despreciar todas las reducciones, empleando directamente los dos pesos, como si estuviesen hechos en el vacío y á la temperatura del maximum de condensacion del agua: porque entonces, siendo S y E los pesos del cuerpo y de un volúmen igual de agua, $\frac{E}{S}$ será su peso específico. Por ejemplo, si el cuerpo pesa en el aire 523 gramos y 84 el agua que desaloja, el peso específico del cuerpo será $\frac{523}{84} = 6{,}226$.

Tambien se puede determinar E, colgando el

cuerpo con una cerda muy fina de uno de los platillos de la balanza, y pesando sucesivamente este cuerpo asi colgado, primero en el aire y despues en el agua. La primera operacion dará el peso S, y la segunda el peso del cuerpo dentro del agua: restando, pues, este peso de S, se tendrá el peso que el cuerpo pierde en el agua, y este peso será E.

Hay cuerpos que se embeben de agua, sin disolverse ni descomponerse, en los cuales la investigacion de su peso específico presenta una especie de equivoco. ¿Se quiere, por ejemplo, conocer el peso específico de un pedazo de asperon, prescindiendo de los intersticios que se hallan en él, y examinando solo cuál seria el peso específico de un cuerpo que tuviese el mismo volúmen esterior, y el mismo peso que este asperon, sin tener intersticios? ¿ó se quiere conocer el peso específico de la materia impermeable que contiene este cuerpo? En ambos casos se puede hallar su peso específico del modo siguiente. Se determina, como hemos hecho antes, el peso del cuerpo seco en el aire, que supondremos sea de 1000 gramos; en seguida se introduce en el agua hasta que esté empapado enteramente, y se ve cuánto ha aumentado su peso; supongamos que este aumento sea de 50 gramos. Se introduce entonces el cuerpo en el frasco, y se ve cuánta agua desaloja; que nos figuraremos sea igual á 240 gramos. Ahora, si se quiere determinar el peso específico del cuerpo bajo su volúmen esterior, es preciso mirar los 50 gramos de agua que ha absorvido, como únicamente destinados á tapar sus intersticios, en cuyo caso el volúmen esterior del cuerpo ha desalojado realmente 240 gramos de agua. Dividiendo, pues, 1000 por 240, el peso específico aparente será 4,167.

Si por el contrario, se quiere saber el peso específico de la materia impermeable del cuerpo, se debe considerar que esta materia no ha desalojado 240 gramos de agua, sino 240 — 50 ó 190, y su peso específico será $\frac{1000}{190}$, ó 5,263.

Cuando se quiere saber el peso específico de una sal, ó de un cuerpo cualquiera que se disuelve en el agua, se elije otro líquido, como el alcool, ó algun aceite en que no se disuelva. Se determina el peso específico de este líquido, relativamente al agua por el método esplicado en el capítulo anterior, que supóndremos sea 0.886. Se valúa en seguida el peso específico del cuerpo dado, relativamente á este líquido, y siendo 3.278; se multiplican estos dos números uno por otro, y el producto espresa el peso específico del cuerpo comparado con el agua.

Se puede determinar tambien el peso específico de los cuerpos sólidos por medio del areómetro, para lo cual se han inventado varias modificaciones hechas en este instrumento. Nos limitaremos á describir el que Mr. Charles emplea en sus cursos hace mas de 20 años, y que llama *areómetro-balanza*, que es el mismo que se conoce en los gabinetes de física bajo el nombre de *areómetro de Nicholson*.

Este instrumento, representado en la fig 69, es un verdadero areómetro de Farenheit, bajo el cual se ha añadido un cubillo de plata HH, agujereado, que sirve para contener el sólido S cuando se le quiere pesar en el agua, y al cual está enganchada la bola de vidrio B llena de mercurio que sirve de lastre. ¿Se quiere pesar un cuerpo sólido? Se pone el areómetro en un gran vaso de agua destilada, cuya temperatura actual se conoce; y se añaden sobre el platillo los pesos necesarios para hacerle entrar hasta la señal T. Supongamos que para esto son precisos 65 gramos, á la temperatura á que se opera. Se quitan estos pesos, y se les sustituye el cuerpo que se quiere pesar, colocandole sobre el platillo: si pesa mas de 26 gramos hace entrar el areómetro mas allá de la señal T, y por consiguiente no se puede pesar con este instrumento: pero si pesa menos de 26 gramos, será necesario añadir algun peso

para introducirle hasta el punto T, y la diferencia de este peso hasta los 26 gramos será el peso aparente del cuerpo en el aire; es decir, que si ha sido preciso añadir n gramos, el peso del cuerpo será $26 - n$.

Quítese ahora el cuerpo del platillo FF, y colóquese en el cubillo de plata HH. Si es mas pesado que el agua hará introducir el areómetro, pero menos que cuando estaba en el aire; y será necesario añadir sobre el platillo mas de n gramos para que se introduzca el instrumento hasta el punto T. Sea este número n': en este caso el peso del cuerpo en el agua será $26 - n'$. Restando este peso del del cuerpo en el aire, se tendrá el peso aparente en el aire de un volúmen de agua igual al cuerpo, y el resultado será la diferencia de los pesos adicionales, ó $n - n'$. Dividiendo $26 - n$ por este número, el cociente espresará el peso específico del cuerpo relativamente al agua en las circunstancias en que se ha hecho la esperiencia.

Por ejemplo, en el *areómetro-balanza* de Mr. Charles, el valor exacto del peso constante adicional es 26.2 gramos cuando la temperatura es 12.°5. Supongamos que habiendo colocado aisladamente sobre el platillo el cuerpo que se quiere pesar á esta temperatura se halla que es necesario añadir 14.1 gramos para hacer entrar el instrumento hasta la señal: entonces el peso del cuerpo en el aire será 26.2 — 14.1 ó 12.1 gramos. Se coloca el cuerpo en el cubillo de plata, y se halla que hay que añadir sobre el platillo, por ejemplo, 4.5 gramos á los 14.1 que habia ya: lo cual dará un peso de 18.6 gramos. Los 4.5 gramos que ha habido que añadir serán el peso del volúmen de agua que desaloja, y por consiguiente su peso específico será $\frac{12.1}{4.5}$, ó 2.6889.

Si el cuerpo fuese mas ligero que el agua al ponerle en el cubillo de plata no pesaria sobre el, y por consiguiente no podria verificarse la operacion. En este caso, Mr. Charles vuelve el cubillo, como

representa la fig. 70, y el cuerpo colocado debajo de él impele hácia arriba al areómetro. Pero como éste por sí mismo exije ya la adicion de cierto peso para introducirse hasta la señal será necesario emplear ahora un peso mayor, y contando como antes lo que hay que añadir al primer peso adicional, esta diferencia espresará el peso que el cuerpo pierde en el agua. Dividiendo, pues, su peso en el aire por esta pérdida, que es el peso de un volúmen igual de agua, el cociente será su gravedad específica, como en el caso anterior.

CAPITULO XXI.

De los fenómenos capilares.

Hemos observado ya algunas veces que los fenómenos mas curiosos de la física son los que nos dan alguna luz sobre la constitucion misma de los cuerpos y sobre la accion recíproca de sus partículas. Vamos ahora á considerar una clase entera muy estensa y variada de fenómenos de este género, tanto mas importante, cuanto que ofrece la gran ventaja de poderse sujetar á un cálculo rigoroso.

Si se suspenden horizontalmente de uno de los platillos de una balanza planchas de vidrio, de metal, de mármol &c.; y despues de haberlas puesto en equilibrio, se les hace tocar la superficie de un líquido, se nota que se adhieren á él con una cierta fuerza, pues para desprenderlas es necesario añadir mas peso al otro platillo. Esta adhesion no es efecto de la presion del aire, pues se verifica igualmente en el vacío. Se ve, pues, que son las moléculas del cuerpo sólido las que se adhieren á las partículas del líquido, en virtud de una fuerza de afinidad. Pero lo que es muy digno de notarse es que entre las partículas del líquido se ejerce tambien una accion de esta especie. En efecto, cuando el disco es susceptible de ser mojado por el líquido, como su-

cede con una lámina de vidrio que se coloca sobre agua ó alcool, al retirarle lleva consigo una capita líquida que se mantiene adherida á él; no es, pues, entonces, hablando exactamente, el cuerpo sólido quien se separa del líquido, sino esta capita quien se separa de las moléculas líquidas que se hallaban debajo de ella. Ahora bien, la fuerza que es preciso emplear para separarla es incomparablemente mayor que su propio peso; y por lo mismo este esceso de fuerza prueba la existencia de una adhesion interior del líquido que mantenia esta capita unida al resto de la masa, independientemente de la gravedad.

Segun las nociones que hemos adquirido ya sobre la atraccion recíproca de las moléculas de los cuerpos, debemos conocer que la fuerza que se ejerce aqui es de la misma naturaleza que estas atracciones, y no producirá efecto sensible sino á distancias muy pequeñas. Esto es cabalmente lo que manifiesta la esperiencia. Cualquiera que sea el grueso que se dé á la materia del vidrio, si la naturaleza y el contorno de su superficie permanecen constantes será tambien la misma la fuerza que habrá de emplearse para separarle del líquido. Por consiguiente, suponiendo al disco un grueso menor que el mas pequeño que pueda darle el arte, todas las nuevas capas materiales que se le añaden no ejercerán sobre el líquido ninguna accion que pueda apreciarse; de donde se infiere que esta accion no puede obrar sino á distancias infinitamente pequeñas. Pero lo que prueba esto hasta la evidencia, es que todos los discos que presentan una misma superficie, cualquiera que sea su naturaleza, con tal que el líquido pueda mojarlos, exijen absolutamente la misma fuerza para separarse de él. Asi, pues, en este caso, la capa de agua infinitamente delgada, que se une á su superficie, constituye una distancia demasiado grande, aunque tan pequeña, entre el disco y la masa líquida, para que esta no esperimente ya ninguna accion sensible; y por tanto, la fuerza

que hay que emplear para separar todos los discos de la misma superficie es igual, porque es siempre la necesaria para separar el líquido de sí mismo.

Cuando se sumerjen en un líquido tubos vacíos, cuyo calibre interior es muy pequeño, se observan fenómenos producidos por la misma causa, pero diferentes en la apariencia. Si el líquido es de tal naturaleza que pueda mojar el tubo, se le ve introducirse en su interior y mantenerse en él, elevado sobre el nivel natural, tanto mas, cuanto mas estrecho es el tubo. Esto se verifica, por ejemplo, sumerjiendo tubos de vidrio en el agua ó en el alcool. En este caso el estremo superior de la columna está determinado por un menisco cóncavo hácia el aire. Pero si la naturaleza del líquido es tal que no pueda mojar el vidrio, como sucede sumerjiendo en mercurio tubos de vidrio húmedos, ó en el agua tubos engrasados, se ve descender el líquido bajo el nivel en vez de elevarse; y entonces el estremo superior de la columna termina en un menisco convexo. En cualquier caso la elevacion ó depresion son tanto mas considerables, cuanto mas estrecho es el tubo. Tales son los fenómenos que los físicos han llamado *capilares*, para espresar que el diámetro de los tubos que sirven para producirlos debe aproximarse á la finura de un cabello.

Estos fenómenos son los mismos en el vacío y en el aire; luego no dependen de la presion de este fluido, pero sí, como los anteriores, de las atracciones ejercidas á distancias muy pequeñas por el tubo sobre el líquido, y por este sobre sí mismo. Así, haciendo variar el grueso del vidrio, de que estan formados los tubos, sin cambiar su diámetro interior, las elevaciones ó depresiones del líquido permanecen absolutamente las mismas que antes; lo cual prueba que pasando el grueso de cierto límite, probablemente menor que el que puede darle el arte, todas las capas que pueden añadirse á la materia del tubo no producen efectos apreciables. Por

una consecuencia de esta ley, cuando varios tubos del mismo diámetro estan completamente mojados por el líquido en toda su estension, la elevacion es la misma en todos, cualquiera que sea su naturaleza; lo cual prueba que la capita interior que se une á su superficie interior es suficiente distancia para que las partículas del tubo no ejerzan ya ningun efecto sobre el resto de las columnas líquidas. En este caso la ascension es la misma en todos los tubos, porque es igual á la que seria en un tubo de igual diámetro, formado por el mismo líquido. Esta igualdad, pues, corresponde á la misma causa que hemos observado en la adhesion de los discos sobre un líquido que los moja. Pero para que se observe en los tubos, es preciso que esten completamente mojados; porque de otro modo el rozamiento del líquido contra las paredes secas hace variar la direccion de los primeros elementos de la superficie libre, y cambia la curvatura de toda esta superficie, como igualmente la diferencia de nivel.

En general, el carácter mas notable de estos fenómenos es el enlace constante que existe entre la elevacion ó depresion de la columna fluida, y la forma cóncava ó convexa en que termina su superficie superior; y en dicho enlace es donde se halla el secreto de este fenómeno, como ha hecho ver Laplace.

Cuando un líquido en reposo toma naturalmente en su superficie la posicion horizontal, se debe concebir que este líquido ejerce sobre sí mismo una accion propia, independiente de la gravedadad terrestre; accion que tiende á hacer entrar las moléculas de la superficie en el interior del fluido, y que produciria realmente este efecto sin la resistencia que nace de la impenetrabilidad. Ahora bien, si por una causa cualquiera esta superficie se hace cóncava ó convexa, como sucede en los tubos capilares, el cálculo demuestra que la atraccion propia del fluido sobre sí mismo, es diferente de lo que era en el es-

tado plano; mayor si la superficie esterior resulta convexa, y menor si resulta cóncava. El primer caso es el del mercurio que baja en los tubos de vidrio, y el segundo el del agua que se eleva en ellos. Respecto á una columna circular contenida en un tubo muy frio, la variacion de la fuerza atractiva es casi exactamente inversa del diámetro interior del tubo; y su espresion analítica se reduce exactamente á la mitad si el tubo se cambia en dos planos paralelos, cuyo intervalo sea el mismo que su diámetro interior.

Partiendo de estos datos matemáticos, es fácil esplicar la razon física que determina la elevacion ó descenso de los líquidos en los tubos capilares. En efecto, empezando por el primer caso, que supone un menisco cóncavo, figura 71, imaginemos un canal infinitamente estrecho y de cualquiera figura, que partiendo del punto mas bajo S del menisco, atraviese el tubo, y se doble por debajo de él, de modo que venga á terminar en H en la superficie libre del fluido. Para que este pueda estar en equilibrio es preciso que lo esté el canal pequeño; pero este último está comprimido en sus dos orificios S y H por dos fuerzas desiguales; la una en H, es la accion de un cuerpo terminado por una superficie plana, y la otra en S en el interior del tubo capilar, es la de este mismo cuerpo terminado por una superficie cóncava; siendo menor por consiguiente esta última. Es, pues, imposible que el equilibrio subsista en este estado; y para que se verifique es forzoso que el líquido se eleve en el tubo capilar hasta que el peso de la pequeña columna elevada compense lo que falta á la accion atractiva por efecto de la concavidad de la superficie. La diferencia de estas acciones está en razon inversa del diámetro del tubo; y por consiguiente la altura de la columnita seguirá la misma razon, lo cual está conforme con la esperiencia.

Si el estremo de la columna líquida fuese con-

vexo en lugar de ser concavo, los resultados serian contrarios. En este caso la accion que ejerciese sobre su propia superficie seria mayor que la del plano, siempre en razon inversa del diámetro del tubo. Por consiguiente, si se supone que un líquido afecta esta forma en un tubo capilar, los razonamientos que acabamos de hacer se aplicarán del mismo modo, y se verá que el pequeño canal curvilíneo está comprimido desigualmente en sus dos estremos, estándolo con mas fuerza por la parte de la superficie convexa que por la de la horizontal. De donde se seguirá que para que haya equilibrio el fluido deberá bajar en el tubo, donde la accion es mas fuerte, á fin de que esta depresion produzca una diferencia de nivel que pueda compensar la debilidad de la fuerza opuesta. La depresion del fluido será, pues, como la diferencia de las dos fuerzas, es decir, inversa del diámetro del tubo, lo que sucede en efecto cuando el fluido no puede mojar el tubo, ni adherirse á sus paredes.

El caracter distintivo de esta teoría es hacer depender todo de la forma de la superficie. La naturaleza del cuerpo sólido y del fluido no hacen mas que determinar la direccion de los primeros elementos, esto es, aquellos en que el fluido toca al cuerpo sólido, porque solo allí se ejerce su afinidad mutua. Una vez establecida esta direccion, es siempre la misma respecto á un fluido y un sólido determinados, cualquiera que sea su figura; pero fuera de estos elementos, y de la esfera de actividad sensible del cuerpo sólido, la direccion de los otros elementos y la forma de la superficie, se determinan únicamente por la accion del fluido sobre sí mismo.

Todas las causas que obrando sobre la superficie interior del tubo pueden cambiar la direccion de los primeros elementos, deben variar tambien la curvatura de la superficie líquida, y por consiguiente la elevacion del fluido. Esto esplica el descenso del agua en los tubos untados interiormente,

la elevacion del mercurio en los tubos secos, y su depresion en los húmedos. El rozamiento puede producir tambien efectos análogos, y Mr. Laplace cita ejemplos de ello. Estos efectos se conciben muy bien segun su teoría; y en lugar de ser estravagantes y ridículos, como parecen al principio, estan sujetos á leyes ciertas, y pueden preveerse exactamente.

Esta teoría esplica tambien con la misma sencillez todos los demas fenómenos capilares, sin escepcion ninguna. Así, la ascension del agua en cilindros concéntricos, ó en tubos cónicos, ó entre planos; la curvatura que toma cuando se adhiere á un plano de vidrio; la forma esférica que tienen naturalmente todas las gotas líquidas; la marcha de una gota de fluido entre dos cristales poco inclinados; la fuerza que impele unos hácia otros á los cuerpos que flotan en la superficie de los líquidos; la adhesion de los discos planos con esta misma superficie, adhesion tan fuerte algunas veces que es necesario un peso muy notable para separarlos &c.; todos estos efectos tan variados se deducen de la misma fórmula, no de un modo vago y conjetural, sino calculados con sus valores numéricos; y de este modo adquieren entre sí relaciones que no podian creerse.

Esta fuerza atractiva, que solo es sensible á distancias muy pequeñas, y de la que derivan todos los fenómenos capilares, es el verdadero orígen de las afinidades químicas. Unicamente que en los fenómenos capilares es donde no se manifiesta en toda su estension, y solo sí por sus diferencias y en razon de las variaciones que produce sobre ella la diferente curvatura de las superficies que terminan los cuerpos: en vez de que en las afinidades químicas la atraccion propia, y en cierto modo individual de las moléculas, es quien obra plenamente y con toda su energía. Los fenómenos capilares pueden, pues, darnos luces importantes, si no sobre la intensidad absoluta de esta atraccion, á lo menos sobre sus caracteres. Las variaciones que sufren, segun las ci-

versas temperaturas, parecen indicar que la energía de la accion, ejercida por un mismo sistema de partículas materiales, no crece proporcionalmente a su condensacion, sino en una relacion menor; lo cual es de una grande importancia con respecto á la accion de los cuerpos sobre la luz, donde se observa tambien esta diminucion.

CAPITULO XXII.

De la elasticidad.

Las esperiencias que hemos hecho hasta ahora nos han presentado los cuerpos como conjuntos de moléculas materiales sumamente pequeñas, sostenidas en equilibrio entre dos fuerzas, á saber, una afinidad mutua que conspira á reunirlas, y un principio repulsivo, probablemente el mismo que el del calor, que tiende á separarlas. Aunque estas moléculas sean tan pequeñas que absolutamente no podamos observar su forma, sin embargo hemos descubierto que colocadas á cierta distancia unas de otras ejercen diferentes atracciones, segun los lados por que se miran. Estas diferencias se hacen sensibles sobre todo cuando los cuerpos líquidos se aproximan al estado sólido, y se ve su efecto en los cristales, donde las moléculas se colocan y adaptan de una manera particular y siempre constante con relacion á cada sustancia cuando su formacion se ha verificado libremente y con lentitud. Como por otra parte hemos observado que las fuerzas atractivas que producen la afinidad no son sensibles sino á distancias muy pequeñas, circunstancia que la teoría de los fenómenos capilares ha puesto en la mas completa evidencia, nos vemos conducidos, generalizando estas ideas, á considerar los diferentes estados de un mismo cuerpo como pasages sucesivos determinados por las relaciones que existen entre la intensidad del principio repulsivo que separa sus partículas, y la

afinidad que las contiene. Si las moléculas del cuerpo se hallan colocadas á distancias tales que la afinidad recíproca de las partículas sea insensible, el principio repulsivo obra solo y sin ser contrapesado; entonces las moléculas se esfuerzan á separarse unas de otras, y se separan en efecto cuando no estan contenidas por algunos obstáculos esteriores. Tal es el caso de las sustancias aeriformes. Acerquemos ahora estas partículas á distancias mucho menores, y tales que la afinidad que las atrae se equilibre con el principio repulsivo que las separa, y tendremos otro estado de los cuerpos. Este estado puede ser tal, que la afinidad de las partículas se ejerza sin que sean aun sensibles las modificaciones de esta afinidad, que dependen de la figura de las partículas, pues hemos dicho que cualquiera que sea la ley de la afinidad, el efecto de estas modificaciones debe debilitarse con la distancia mucho mas rápidamente que la fuerza principal. Entonces las moléculas se atraerán del mismo modo, cualquiera que sea su posicion relativa al rededor del centro de gravedad. Los caracteres permanentes de este estado deberán ser, pues, una movilidad perfecta de las partículas, resultado de sus atracciones siempre semejantes, y una gran resistencia á la compresion producida por la fuerza del principio repulsivo, que es mucho mas considerable que en los gases. Tal es el caso de los cuerpos líquidos. En fin, si se suponen las partículas conducidas á distancias aun mas pequeñas, podrán llegar á ser sensibles, no solo su fuerza principal de afinidad, sino tambien las modificaciones de esta misma fuerza, dependientes de su figura. Si las moléculas se dirijen á estas distancias gradualmente, y conservando la libertad de poderse mover, se volverán y dispondrán de modo que se junten, ó mas bien se aproximen por los lados en que mas se atraen; y por esta disposicion general y regular formarán un cuerpo sólido cristalizado. Pero estas posiciones de equilibrio podrán no

ser las únicas que constituyan la solidez, porque si circunstancias estrañas, por ejemplo, la agitacion de las partículas, ó un rápido enfriamiento, les impiden tomar exactamente las disposiciones favorables al máximum de su atraccion, se verán obligadas á acercarse por otros lados, y presentarse en otras situaciones en que la influencia de su figura sea aun sensible, aunque distinta de la que seria en el caso de una colocacion libre y espontánea. Tal será el caso de las sustancias sólidas no cristalizadas.

Pero por una consecuencia de esta colocacion, y por lo mismo que no es únicamente esta disposicion de las partículas la que puede producir un equilibrio semejante, se sigue que sometiendo el cuerpo sólido á fuerzas mecánicas, como presiones ó choques violentos, se podrá, á lo menos en ciertas sustancias, obligar á las partículas á presentarse por diferentes lados, sin que por eso se destruya su estado de solidez. Aun se puede concebir esta accion esterior de tal modo irregular, que obre de diferente manera sobre las diversas partículas del cuerpo, haciéndolas mover en distintos sentidos, y aun separando algunas entre sí enteramente, sin mover sensiblemente las otras. Tal es el caso de los cuerpos sólidos que se golpean ó rompen con un martillo, ó se muelen con una mano de mortero. Pero si las fuerzas que obran de este modo se conducen con inteligencia, y la naturaleza de las sustancias permite á sus partículas diferentes estados de equilibrio sólido, el cuerpo podrá adquirir asi nuevas formas y propiedades; podrá estenderse en láminas, hilarse en arambres, ó redondearse en vaso, y podrá adquirir mayor dureza en su superficie. Tal es el caso de ciertos metales; y es claro que para obligar á las partículas á alterar sus posiciones de equilibrio, se necesita cierta fuerza. Las esperiencias hacen ver que para que esta fuerza prodúzca un efecto sensible y permanente, debe esceder de un límite determinado respecto á cada sustancia y á cada estado de esta

misma sustancia; de suerte que siendo la fuerza menor que este límite, la partícula sobre quien obra, no cambia su posicion de equilibrio. Se separa un poco mientras la fuerza obra sobre ella; pero luego que se ve abandonada á sí misma vuelve á su primer estado de equilibrio y á su posicion primitiva por una serie de oscilaciones. Esta propiedad constituye lo que se llama *elasticidad* de los cuerpos, la cual seria perfecta en una sustancia cuyas partículas resistiesen á la dislocacion, cualquiera que fuese la fuerza que obrase sobre ellas, y volviesen siempre á su primera posicion de equilibrio despues de haberla abandonado momentáneamente. Este es el caso de una lámina de vidrio, que, doblándola, vuelve absolutamente á su posicion hasta cierto grado de curvatura en que se rompe; no llegando á darla esta curvatura, las partículas que la componen no mudan sus puntos de adhesion, y la elasticidad es perfecta. Pero esta será imperfecta si las partículas no son conducidas por sus oscilaciones precisamente á la misma posicion de equilibrio que tenian al principio: tal es el caso de una lámina de hierro, que encorvada, no vuelve á tomar enteramente la misma direccion. En fin, la elasticidad será nula é insensible si las moléculas, movidas por la mas pequeña fuerza, no manifiestan ninguna tendencia para volver á su posicion: tal es el caso de una lámina delgada de plomo, que doblada, queda en la posicion que se la da. En todos los casos se ve que la elasticidad debe ser distinta de la coesion, pues esta es la fuerza absoluta con que se adhieren unas partículas á otras, y aquella es la tendencia que tienen en ciertos casos para volver á su posicion primitiva cuando una fuerza esterior y pasagera las ha separado momentaneamente de ella, una cantidad estremamente pequeña, y menor que la distancia a que su figura tendria una influencia diferente sobre el modo o la intensidad de su agregacion.

Estas consideraciones, indicadas por el conjunto

de observaciones que hemos hecho ya, pueden comprobarse por la esperiencia, estirando hilos metálicos por medio de pesos conocidos, y dejándolos volver sobre sí mismos, ó torciéndolos un número determinado de vueltas, y dejándolos destorcer libremente. Estas vueltas al estado primitivo se hacen siempre por un número de oscilaciones de duracion igual; y la fuerza que conduce á él al cuerpo es siempre proporcional á la separacion que se le ha dádo. Asi, en los hilos estirados la fuerza de retraccion es proporcional á la cantidad que se han alargado momentaneámente; y en los hilos torcidos la reaccion es exactamente proporcional al ángulo de torsion.

La elasticidad que conduce las partículas á sus posiciones primitivas, cuando se les ha separado de ellas, existe no solo en los metales, sino en todos los cuerpos de la naturaleza, reducidos á fibras muy delgadas. Igualmente existe en los hilos sutilísimos que salen del cuerpo del gusano de seda, como se vé sensiblemente reuniéndolos en gran número. La tela de araña aun mas fina, es tambien elástica, pues cede á la presion sin romperse, y vuelve sobre sí misma cuando cesa la fuerza que tiraba de ella.

Al ver que muchas propiedades físicas de los cuerpos, como la elasticidad, la dureza &c., se modifican tan fuertemente con las operaciones del batido, el recocido y el temple, parece natural tratar de descubrir en qué consiste esta influencia y de qué modo obra. Desde luego parece que el batido haciendo aproximar por fuerza unas partículas á otras, da al metal un aumento de densidad que le quita el recocido; y esto basta para concebir estas dos operaciones. En cuanto al temple, es mucho mas difícil de esplicar. Para poderse formar una idea de ella, es necesario partir de un principio general, á saber, que el acero, despues de templado, no tiene las mismas dimensiones que anteriormente; á igual temperatura ocupa siempre un volúmen ma-

yor, de manera que el temple le tiene en cierto modo en un estado violento de dilatacion, cuya prueba ofrecen un gran número de operaciones de las artes. Si se tornean cuñas cilíndricas de acero, de modo que entren muy justas en un cilindro hueco del mismo diámetro, y en seguida se templan, sin templar el cilindro, no pueden ya entrar en él. Si se les templa dentro de él y la materia del cilindro hueco no es susceptible de temple, de modo que enfriándose vuelva á tomar sus dimensiones primitivas, las cuñas dilatándose la comprimen sobre sí misma por todas partes, como si se les hubiese introducido con violencia en un agujero mucho menor que su diámetro, y asi quedan sujetas dentro del cilindro hueco con una fuerza increible. Mr. Fortin, que ha hecho varias esperiencias sobre este punto, ha hallado que es incontestable la dilatacion con el temple; pero que su estension varía segun las dimensiones de las piezas templadas, aunque todas sean del mismo acero, y se espongan á temperaturas exactamente iguales. Sin embargo, el hecho solo de la dilatacion da alguna luz sobre el fenómeno del temple. Parece que en el instante que el acero muy caliente se introduce de pronto en una temperatura muy baja, el frio que se apodera de las capas esteriores de la masa con mas facilidad que del centro, las obliga á amoldarse, por decirlo asi, sobre este centro caliente y dilatado; lo cual las hace tomar dimensiones mayores que las que tendrian si hubieran quedado gradualmente abandonadas á sí mismas. Las moléculas colocadas en el interior se enfrian á su vez; pero hallándose ya en un estado fijo las capas esteriores, las contienen por su atraccion, determinan el volúmen que deben llenar, y les impiden acercarse tanto como si hubiesen sufrido libremente un enfriamiento gradual.

Segun este modo de ver, el estado de temple del acero es un estado forzado en que las partículas se hallan dispuestas de otro modo que se halla-

rian si hubiesen sido abandonadas al efecto de sus atracciones mútuas; y no debe ya admirarnos que la dureza, la elasticidad, y las demas propiedades fisicas que dependen de la colocacion de las partículas, queden tan modificadas. Pero ¿por qué la rapidez del enfriamiento produce estos efectos sobre el acero, y no ocasiona ninguna variacion sensible en el oro, el estaño, el cobre y los demas metales simples? ¿Por qué esta misma causa produce resultados contrarios sobre la aligacion que sirve para hacer las *campanas* y cimbanillos, segun ha observado Mr. Darcet, y yo mismo he comprobado? Porque esta mezcla, compuesta de 78 partes de cobre y 22 de estaño, es quebradiza y no maleable, cuando despues de haberla calentado hasta enrojecerse, se la deja enfriar lentamente en el aire; y por el contrario es flexible y maleable cuando despues de haberla calentado del mismo modo, se la introduce de repente en el agua fria. En el primer caso, su grano es de un blanco brillante como el estaño: en el segundo es amarillo, del color del cobre. Hemos visto antes que estas operaciones producen tambien diferencias muy considerables en el grano del acero; y asi es forzoso creer que hay en estos fenómenos una mudanza de combinacion entre las partículas de distinta naturaleza que componen el acero y la aligacion. Sin embargo, esta composicion no parece ser una condicion esencial para que se pueda cambiar de una manera durable el estado de agregacion de una sustancia. El hierro y el cobre, espuestos algunos minutos á una corriente de gas amoniaco, se vuelven quebradizos y desmenuzables, sin que se observe en la balanza ninguna variacion sensible; y al mismo tiempo descomponen completamente este gas, como ha observado Mr. Thenard. Segun este mismo químico, el fósforo puro, calentado hasta 60.° centesimales, y enfriado lentamente en el aire, es blanco y transparente; pero si se le enfria de pronto metiéndole en agua se vuelve ne-

gro y opaco como el carbon, pudiéndosele hacer pasar alternativamente de un estado al otro cuantas veces se quiera. Todos estos efectos tan diversos producidos por la manera de enfriarse, son imposibles de prever de otro modo que por la esperiencia. Son otros tantos estados posibles de equilibrio entre todas las fuerzas de que se hallan animadas las partículas; y estas fuerzas son demasiado desconocidas y numerosas para poderse calcular de antemano el resultado de su combinacion, segun las circunstancias en que se les pone.

El vidrio templado se endurece como el acero, y se hace escesivamente frágil, como se puede esperimentar dejando caer en agua fria gotas de vidrio fundido. Por efecto de este enfriamiento súbito, toman un nuevo estado de agregacion, y si se rompe la parte mas pequeña de la especie de bóveda que forman todas sus partículas, se reducen á un polvo fino. Asi se forman las lágrimas batávicas con que se divierten los niños, y que pueden servir tambien para la meditacion de los fisicos. Los efectos que producen indican indudablemente un estado de agregacion determinado, dependiente de la causa de frio que ha obrado sobre ellas; pero lo que lo prueba aun con mayor evidencia es que pierden estas propiedades si se les calienta de nuevo y se les deja enfriar con lentitud.

De la balanza de torsion.

Despues de haber analizado con el mayor cuidado los efectos de la torsion de los hilos metálicos, Coulomb los ha aplicado felizmente á la construccion de un instrumento que puede servir para medir las fuerzas pequeñas. Este instrumento está formado con un hilo metálico vertical, cuyo estremo superior está unido á un punto fijo, y el inferior, e tirado por un pesito, lleva una aguja horizontal. Cuando se quieren medir fuerzas muy pequeñas, se

las hace obrar sobre la punta de esta aguja, y se aprecia su intensidad por el ángulo que forma la nueva direccion que toma con la que antes tenia. En una palabra, estas fuerzas se *balancean* por la torsion, y por eso Coulomb ha dado al instrumento el nombre de *balanza de torsion*.

Para que la agitacion del aire no altere el movimiento de la aguja, se la encierra en una caja cilíndrica de vidrio, y el hilo en un cilindro de vidrio vacío; en cuya parte superior hay una muestra dividida que puede girar, aunque muy oprimida, al rededor del cilindro. El ganchito que sostiene el hilo lleva una aguja horizontal que marcha sobre esta muestra, y sirve de índice cuando se quiere torcer el hilo un número determinado de grados. En fin, una division circular colocada horizontalmente al rededor de la caja de vidrio mide la marcha de la aguja. Todo el aparato está representado en la fig. 72.

Se dan al hilo y á la aguja diferentes longitudes y gruesos, segun el objeto á que se destinan. Si se quieren esperimentar fuerzas muy pequeñas, y dar una gran sensibilidad al aparato, es preciso emplear hilos largos y finos, porque la fuerza de torsion es inversamente proporcional á la longitud de los hilos, y directamente á las cuartas potencias de sus gruesos. Los hilos largos tienen ademas la ventaja de poderse torcer un número mayor de grados sin que se altere su elasticidad. Ademas es preciso emplear las materias cuya elasticidad es mas perfecta.

La balanza de torsion puede servir para hacer sensible la atraccion que todos los cuerpos de la naturaleza ejercen unos sobre otros en proporcion directa de su masa é inversa del cuadrado de su distancia; atraccion que con respecto á la masa de la tierra produce la gravedad, en virtud de la cual caen todos los cuerpos hácia su centro. Supongamos, en efecto, que hallándose el hilo en reposo, se bajan verticalmente junto á los estremos de la aguja y en senti-

dos opuestos dos esferas de cualquier materia. Si realmente ejercen una atraccion sobre las moléculas de la aguja, y recíprocamente son atraidas por ella, la aguja debe separarse de su posicion natural, y encaminarse hácia las esferas que la atraen, hasta que la fuerza de torsion aumentada por este movimiento equilibre á la atraccion. Aun entonces seguirá la aguja marchando, no ya en virtud de la atraccion que la fuerza de torsion equilibra, sino en virtud de la velocidad que ha adquirido anteriormente. Asi seguirá marchando hasta que destruida esta velocidad por la fuerza de torsion, siempre creciente, haga volver á la aguja hácia su punto de reposo, y se le haga pasar hasta cierta distancia, de donde volverá nuevamente á moverse hácia las esferas, haciendo una serie de oscilaciones. Este efecto se hará mucho mas sensible poniendo mayor cantidad de masa hácia los estremos de la aguja, lo cual se conseguirá haciéndola muy delgada, y terminándola con dos esferas. Esto dará tambien la ventaja de facilitar el cálculo de la esperiencia; porque en la ley de la atraccion proporcional al cuadrado de las distancias, se demuestra que una esfera atrae á un punto esterior, como si toda su masa estuviese reunida en el centro; y aunque la masa de la aguja no puede ser nunca enteramente nula, es fácil concebir que si es muy pequeña con respecto á las esferas, no tendrá igualmente sino una influencia muy débil sobre las oscilaciones, y será muy fácil contar con ella en el cálculo; de este modo se sabrá qué masa deben tener las dos esferas para que el brazo de la balanza oscile con tal velocidad. Comparando estas oscilaciones á las de un péndulo ordinario de la misma longitud, movido solo por la gravedad terrestre, se conocerá la relacion de esta fuerza con la que ejercen las esferas. De aqui se deducirá por medio del cálculo la relacion de las masas de las esferas con la masa de la tierra; y siendo tambien conocidos sus volúmenes, se sabrán las relaciones de sus densida-

des. Cavendish, que ha hecho esta hermosa esperiencia, ha hallado que la densidad media de la tierra es igual á 5,5, siendo 1 la del agua.

Coulomb ha empleado tambien la balanza de torsion para medir la energía de las fuerzas eléctricas y magnéticas, como esplicaremos mas adelante. Tambien ha hecho uso de ella para apreciar la adherencia de los fluidos consigo mismos por las oscilaciones de un disco plano y horizontal que ponia en movimiento con la torsion.

CAPITULO XXIII.

Del rozamiento.

Cuando dos cuerpos se hallan colocados uno sobre otro tocándose sus superficies planas, nace de su contacto una fuerza que los mantiene unidos con cierta energía, y se opone á que puedan resvalarse sobre las superficies que se tocan; esta fuerza se llama *rozamiento.*

Este fenómeno parece á primera vista causado por el enlace de las asperezas de ambos cuerpos; pero reflexionando sobre él, se ve que no es posible atribuirle á esta sola causa. Es cierto que el rozamiento es muy enérgico en los cuerpos rudos; pero existe tambien en los mas tersos, en que es muy dificil creer que puedan enlazarse las asperezas. Ademas, no se nota en estos cuerpos que haya destruccion alguna de las partes de estas superficies, cuando se les fuerza á correr uno sobre otro, como deberia suceder si sus asperezas se rasgasen unas con otras. El verdadero medio de decidir esta cuestion, si puede serlo, es estudiar el rozamiento por medio de la esperiencia. Esto se consigue eligiendo por uno de los dos cuerpos un plano inclinado, al que se puedan dar sucesivamente muchas inclinaciones diferentes y mensurables por medio de una division circular, fig. 73. Se coloca sobre este plano uno de

los cuerpos que se quieren esperimentar, al cual se há hecho anteriormente una superficie plana, y se eleva el plano hasta que el cuerpo se separe de él por efecto de la gravedad. Es claro que un momento antes de que esto suceda, la energía del rozamiento es igual al peso del cuerpo descompuesto paralelamente al plano inclinado, es decir, multiplicado por el seno del ángulo que el plano forma con el horizonte. De este modo se obtendrá una medida del rozamiento, exacta y comparable.

Por medio de esperiencias de esta especie se hallan los siguientes resultados. Siendo iguales todas las demas circunstancias, el rozamiento disminuye á medida que son mas tersas las superficies; y es mayor entre cuerpos de la misma materia, que entre cuerpos de materia diferente. El rozamiento no llega á su maximum de energía en el momento del contacto, sino despues de cierto tiempo, durante el cual aumenta cada vez mas hasta cierto término, del cual no pasa. En fin, su energía es proporcional à la presion, independientemente de la estension de las superficies; de suerte, que un poliedro, cuyas caras estan igualmente tersas, roza siempre igualmente cualquiera que sea la cara sobre que se halle colocado, lo cual parece muy contrario á la idea de penetracion de partes. Se observa tambien que el rozamiento es mayor cuando las mismas partes de un cuerpo recorren sucesivamente las diversas partes del otro, como en la caida por el plano inclinado, que no cuando las diversas partes del primero tocan á diversas partes del segundo, como cuando una bola rueda sobre una mesa de billar. El primero de estos rozamientos se llama *rozamiento de primera especie*, y el segundo *rozamiento de segunda especie.*

FIN DEL TOMO PRIMERO.

TABLA

DE LOS LIBROS Y CAPÍTULOS QUE CONTIENE ESTE TOMO.

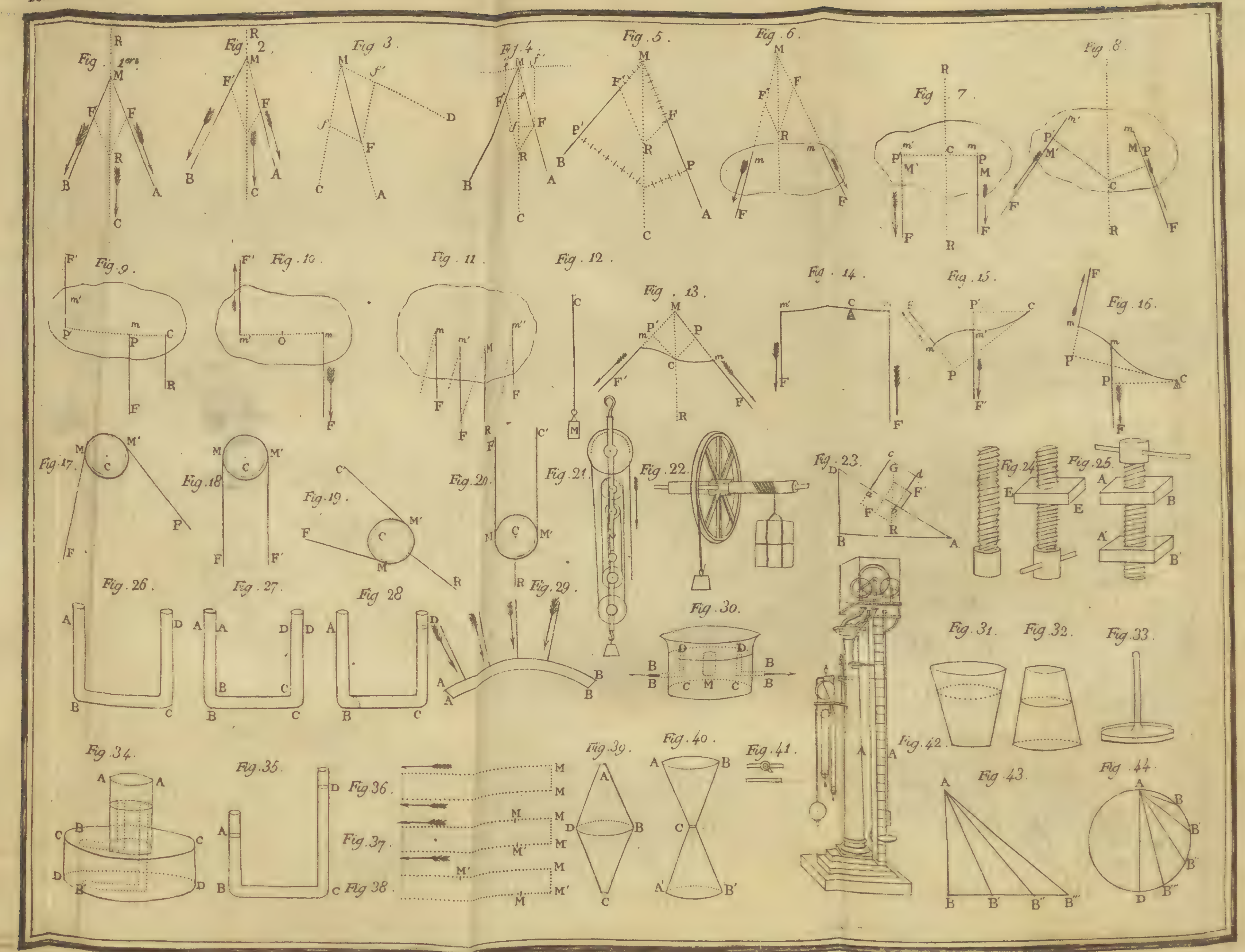

Fig. 1ere
Fig. 2.
Fig 3.
Fig. 4.
Fig. 5.
Fig. 6.
Fig 7.
Fig 8.
Fig. 9.
Fig. 10.
Fig. 11.
Fig. 12.
Fig. 13.
Fig. 14.
Fig. 15.
Fig. 16.
Fig. 17.
Fig. 18
Fig. 19.
Fig. 20.
Fig. 21.
Fig. 22.
Fig. 23.
Fig. 24
Fig. 25.
Fig. 26.
Fig. 27.
Fig 28
Fig. 29.
Fig. 30.
Fig. 31.
Fig. 32.
Fig. 33.
Fig. 34.
Fig. 35.
Fig 36.
Fig. 37.
Fig 38.
Fig. 39.
Fig. 40.
Fig. 41.
Fig. 42.
Fig 43.
Fig 44.



Fig. 45. Fig. 46. Fig. 47. Fig. 48. Fig. 49. Fig. 50. Fig. 51. Fig. 52. Fig. 53.

Fig. 54. Fig. 55. Fig. 56. Fig. 57. Fig. 58. Fig. 59. Fig. 60. Fig. 61. Fig. 62. Fig. 63.

Fig. 1ère. Fig. 9. Fig. 10.

Fig. 2. Fig. 12. Fig. 13. Fig. 14. Fig. 15.

Fig. 6. Fig. 3. Fig. 11.

Fig. 4. Fig. 7. Fig. 16.

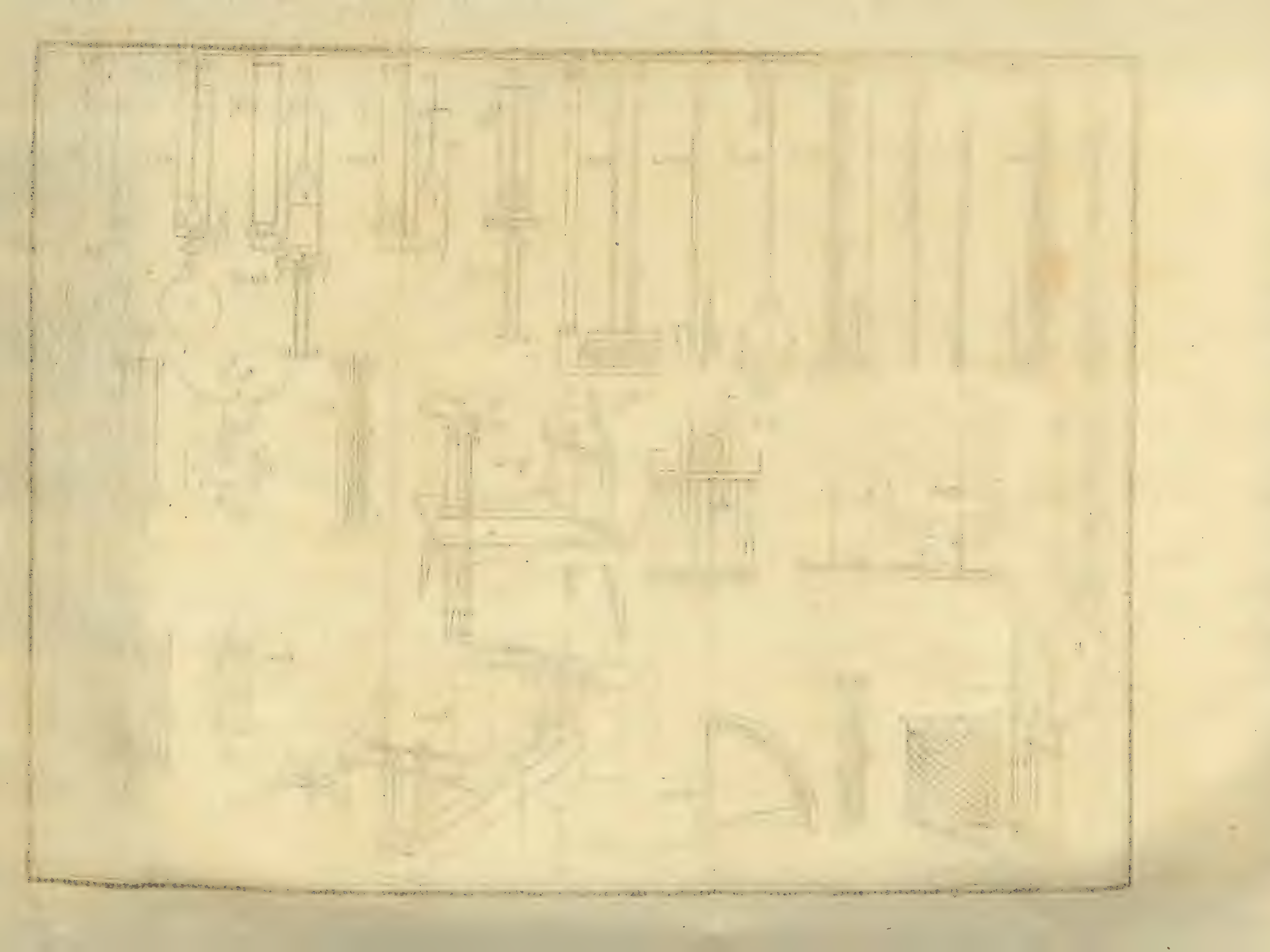
Fig. 5. Fig. 8. Fig. 17.



Fig. 18 Fig. 19 Fig. 20. Fig. 21 Fig. 22. Fig. 23 Fig. 24 Fig. 25 Fig. 26 Fig. 27 Fig. 28 Fig. 29 Fig. 30

Fig. 31 Fig. 32 Fig. 33 Fig. 34 Fig. 35 Fig. 36 Fig. 37

Fig. 38 Fig. 39 Fig. 40 Fig. 41 Fig. 42 Fig. 42



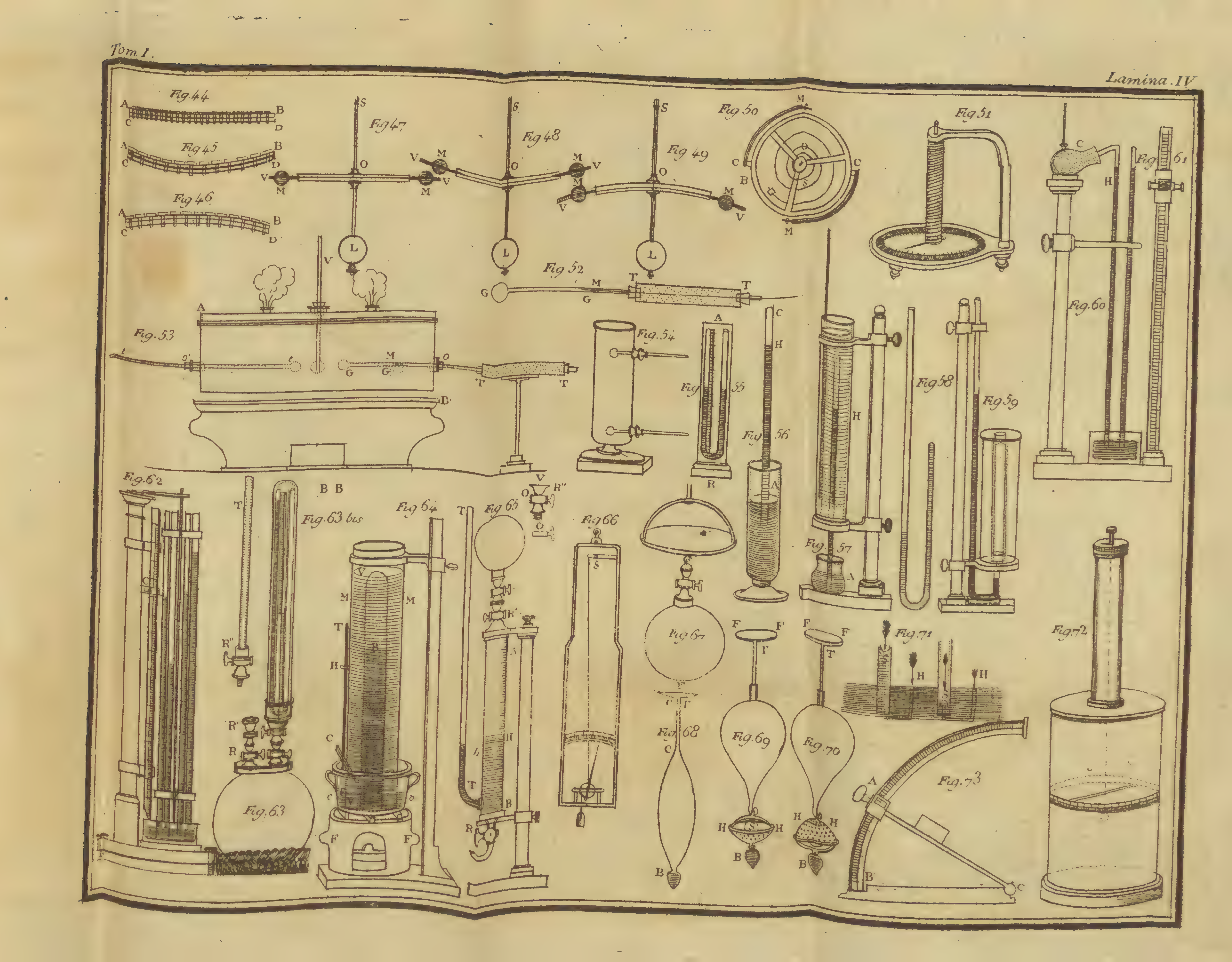
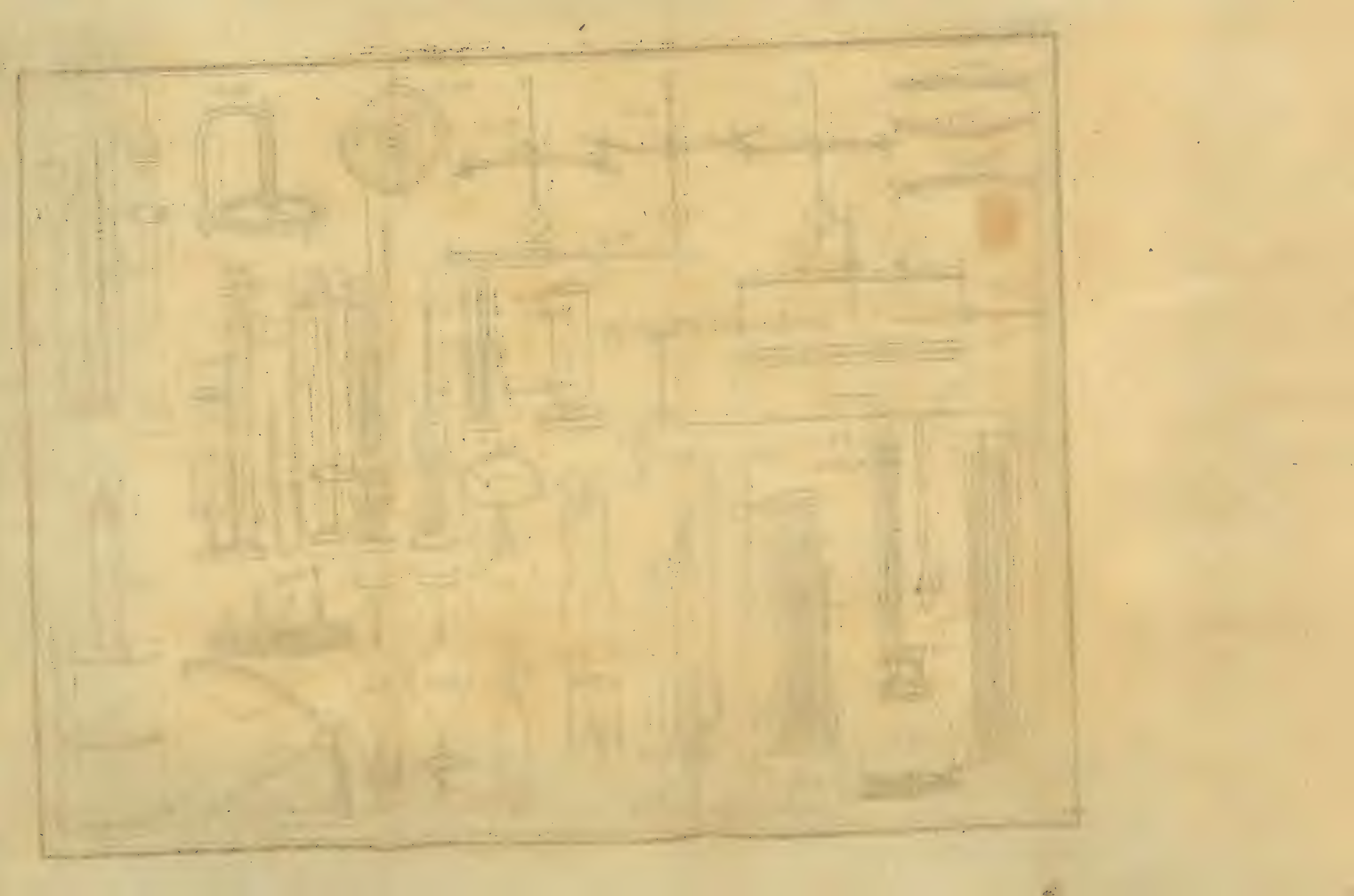
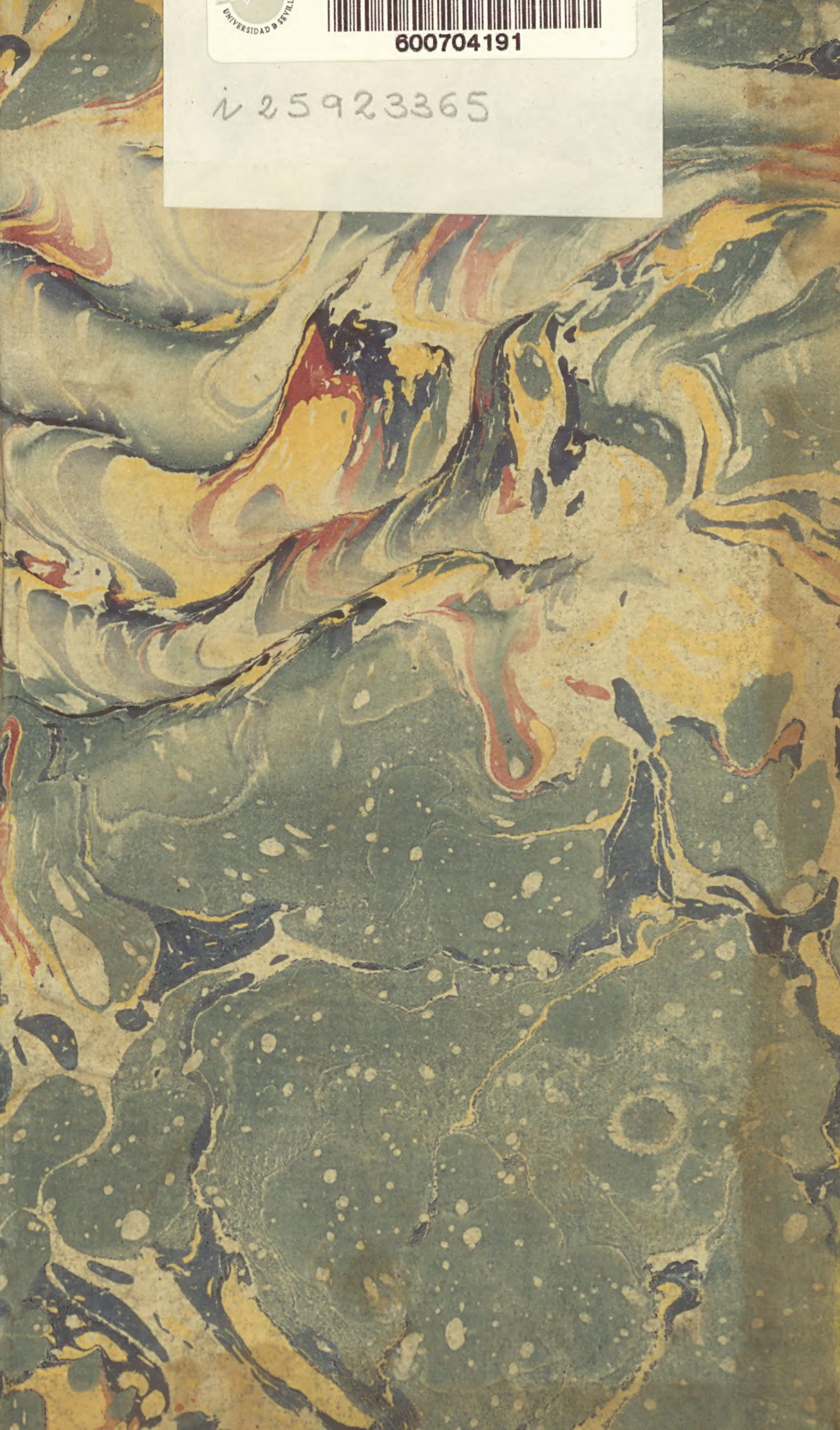
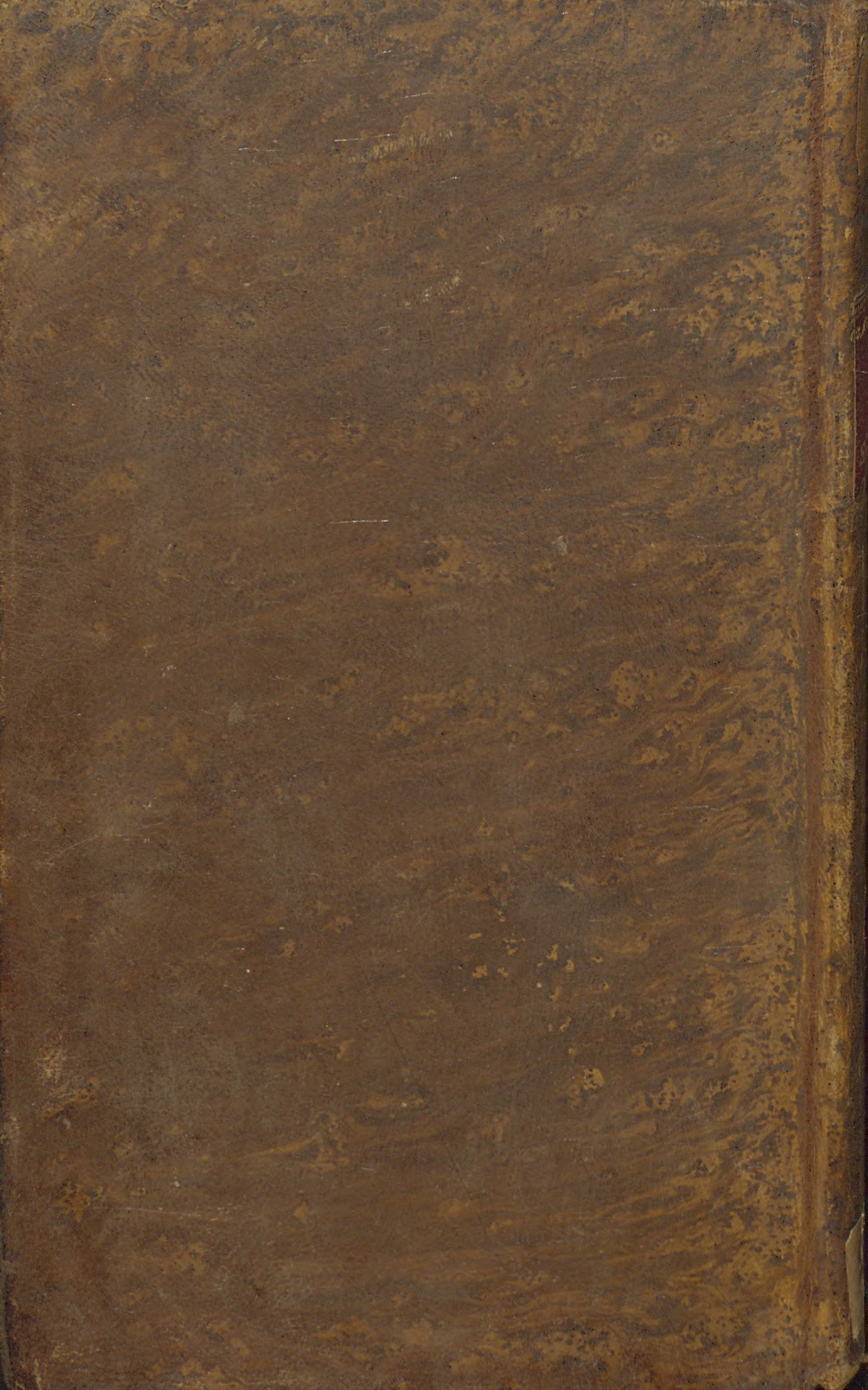


Fig. 44
Fig. 45
Fig. 46
Fig. 47
Fig. 48
Fig. 49
Fig. 50
Fig. 51
Fig. 52
Fig. 53
Fig. 54
Fig. 55
Fig. 56
Fig. 57
Fig. 58
Fig. 59
Fig. 60
Fig. 61
Fig. 62
Fig. 63
Fig. 63 bis
Fig. 64
Fig. 65
Fig. 66
Fig. 67
Fig. 68
Fig. 69
Fig. 70
Fig. 71
Fig. 72
Fig. 73










colorchecker CLASSIC
calibrite
mm